

Mayo 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

FÍSICA
Claves de la simulación cuántica

ASTRONOMÍA
Origen del agua en la Tierra

MEDICINA
Combatir el dolor crónico

La mente neandertal

Inteligencia y cultura en nuestros enigmáticos primos evolutivos



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA MENTE NEANDERTAL | SIMULACIÓN CUÁNTICA | COMBATIR EL DOLOR CRÓNICO

MAYO 2015 N.º 464



ARTÍCULOS

JUSTIN McMANUS, GETTY IMAGES


48


50



88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Existe la idea peyorativa de que los neandertales eran poco ingeniosos. ¿Eran nuestros primos extintos realmente tan diferentes de nosotros? Los datos anatómicos y genéticos han arrojado escasa luz sobre sus capacidades cognitivas. Pero los nuevos estudios sobre los restos culturales que dejaron atrás sugieren que eran mucho más inteligentes de lo que se pensaba. Imagen de Jean-François Podevin.



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2015

EL PROBLEMA DEL HORIZONTE

En «Agujeros negros y muros de fuego» [Investigación y Ciencia, abril de 2015], Joseph Polchinski explica las razones que le llevaron a concluir que los agujeros negros deberían estar rodeados por una barrera de alta energía, o «muro de fuego», en lugar de por un horizonte de sucesos. Dichas razones aparecen al considerar las propiedades del entrelazamiento cuántico entre las partículas de Hawking antiguas («C») y recientes («A» y «B») emitidas por un agujero negro (A es absorbida de inmediato por el objeto).

Si los muros de fuego existen, la solución clásica asociada a un agujero negro no puede ser válida, ya que esta predice un horizonte suave, no un muro de fuego. Sin embargo, la demostración de Hawking de que un agujero negro radia partículas nace justamente al considerar las propiedades de los campos cuánticos en las inmediaciones de un horizonte de sucesos suave. Si dicha geometría no es real, ¿puede demostrarse la existencia de la radiación de Hawking? Si este fenómeno no puede probarse, ¿qué argumento conduciría a la existencia de muros de fuego?

Por otro lado, para evitar la «poligamia» del entrelazamiento entre A, B y C, ¿no podría ocurrir que los efectos gravitatorios modificasen la estructura del vacío cuántico de tal modo que las partículas A y B se creasen en un estado no entrelazado?

Por último, ¿tienen estos muros de fuego algo que ver con la «atmósfera térmica» de los agujeros negros considerada por Adam Brown en su artículo «Minería de agujeros negros» [Investigación y Ciencia, abril de 2015]?

Paula F. Arroyo
Barcelona

Responde Polchinski: *Todas ellas son preguntas excelentes.*

Hay dos razones por las que la existencia de muros de fuego no cambia la predicción de Hawking. La primera surge al suponer que los muros de fuego solo afectan a lo que ocurre detrás del horizonte, que es lo mínimo que requiere la paradoja. Es cierto que el cálculo original de Hawking suponía la existencia de un horizonte de sucesos suave. Pero, si solo modificamos lo que sucede detrás del horizonte, la radiación exterior no podrá verse afectada, ya que nada de lo que ocurre en el interior de un agujero negro puede influir en lo que hay fuera. El cálculo se torna más complejo, pero el resultado debería ser el mismo.

Nuestros colegas no encontraron este argumento completamente satisfactorio. Sin embargo, hay una razón más convincente aún. Como explicaba en el artículo, los trabajos de Juan Maldacena, Andrew Strominger y Cumrun Vafa nos han permitido entender la entropía de los agujeros negros en términos de su estructura microscópica. Según las leyes de la termodinámica, toda entropía implica una temperatura, y un cuerpo a temperatura finita debe radiar. En mi opinión, este segundo argumento es muy robusto.

Alterar las propiedades del vacío cuántico exigiría introducir algún efecto tan devastador como los muros de fuego. Tal vez el artículo tendría que haber hecho más hincapié en este aspecto: los muros de fuego son el resultado de seguir nuestro entendimiento del problema hasta su última conclusión. Pero, si algo realmente drástico sucediese en el horizonte —como una modificación de las reglas de la mecánica cuántica—, entonces puede que no fuese necesario postular muros de fuego.

En cuanto a la relación de los muros de fuego con el trabajo de Brown, nuestro artículo original empleaba algunas ideas relacionadas con dicho proceso de «minería». En él describíamos dos experimentos mentales: uno en el que la radiación de Hawking pasada (C) escapaba del agujero negro de la forma usual, y otro en el que una parte de ella era extraída mediante minería. La segunda versión es algo más complicada, pero permite argumentar a favor de un muro de fuego incluso más drástico. (En el cálculo habitual, algunas de las partículas que en principio escaparían en forma de radiación de Hawking acaban cayendo en el agujero negro; el proceso de minería permite rescatarlas antes de que sean absorbidas.)

Errata corrige

En el artículo **La riqueza idiomática de los Andes** [por Paul Heggarty; Investigación y Ciencia, enero de 2015] concurren varias imprecisiones. En la página 40 se afirma erróneamente que la llegada del aimara a la zona del lago Titicaca se produjo hace 700 años; la datación correcta es unos 600 años. En la página 39, «cordillera central peruana» debería sustituirse por «sierra central peruana». En la página 41, la denominación «reino aimara» debería reemplazarse por «señorío aimara». Por último, en la tabla de la página 39, las transcripciones correctas de las voces *dos* en la lengua hablada en Tiahuananco y *cinco* en quechua deberían ser, respectivamente, *paja* y *pichqa*.

En **Un punto débil de la resistencia bacteriana** [por Carl Zimmer; Investigación y Ciencia, marzo de 2015], en el segundo párrafo de la segunda columna de la página 32, las dos menciones a la «membrana» celular deben sustituirse por «pared».

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



ECOLOGÍA

La caída de las hojas, condicionada por la floración

El comienzo del otoño depende de la llegada de la primavera

El brote de las yemas y las flores anuncia la llegada de la primavera, pero resulta mucho más difícil señalar el inicio natural del otoño. Los espectaculares cambios de color del follaje otoñal surgen de manera gradual y varían con la geografía. A los ecólogos se les resiste la modelización de la cronología otoñal, por no hablar de la predicción de su inicio en el próximo siglo. Pero lograr este objetivo permitiría predecir los cambios estacionales que se espera que sucedan en el clima del futuro.

El planteamiento habitual para predecir la fecha de inicio del otoño se basa en dos variables: temperatura y duración del día. Trevor Keenan, de la Universidad Macquarie en Sídney, y Andrew Richardson, de la Universidad Harvard, sabían que el modelo era demasiado simplista porque a menudo los resultados dejaban que desear. Así que analizaron las observaciones sobre el follaje del arbolado realizadas durante unos veinte años en el Bosque de Harvard, en Massachusetts, y en el Bosque Experimental Hubbard Brook, en New Hampshire, así como los datos de satélite del follaje del este de EE.UU. obtenidos durante trece años. Los resultados revelaron un nuevo condicionante del comienzo del otoño: la llegada de la primavera. El análisis, publicado en *Global Change Biology,* reveló que si un árbol iniciaba el crecimiento primaveral un día antes, definido tal momento como la fecha en que había brotado el cincuenta por ciento del follaje o en que las hojas habían adquirido la mitad de la longitud definitiva, el otoño se anticipaba un promedio de 0,6 días en ese árbol. «Es un hallazgo inesperado», opina el ecólogo de la Universidad de Boston Richard Primack, ajeno al estudio.

Keenan y Richardson ignoran por qué la llegada del otoño parece depender del inicio de la primavera anterior. «Lo que sucede realmente bajo el dosel —los procesos que dan comienzo al otoño— es muy complejo y poco conocido», afirma Keenan. Es posible que las hojas estén programadas para caer a cierta edad y que la senescencia se inicie antes si la primavera lo hace también. O tal vez la llegada temprana de esta estación signifique que los árboles absorben más agua del suelo, lo que limitaría el aporte hídrico al final del período de crecimiento y mataría las hojas prematuramente.

Ese aparente vínculo entre la primavera y el otoño seguramente resulte perjudicial para los humanos. Con el viejo modelo, los ecólogos habían predicho que en un siglo el otoño comenzaría dos semanas más tarde en un clima siete grados más cálido, un resultado que mitigaría el calentamiento global porque el verano más largo permitiría a los bosques fijar más dióxido de carbono de la atmósfera. Pero el modelo de Keenan y Richardson indica que la anticipación de la primavera en un planeta más cálido adelantará también el otoño. Como consecuencia de tal situación, el otoño se retrasará muy pocos días, por lo que los árboles no podrán capturar un volumen mucho mayor de carbono.

Esta nueva idea dista de ser la última palabra acerca de las alteraciones del otoño, pero el estudio merece la atención de futuras investigaciones.

—Annie Sneed

THINKSTOCK/S847

GEOFÍSICA

La dinámica oculta de los géiseres

Un nuevo estudio recrea con un detalle sin precedentes la física de estas erupciones de agua y vapor

El géiser Old Faithful («Viejo Fiel»), en el Parque Nacional de Yellowstone, confunde tanto como fascina a los turistas con sus recurrentes erupciones. Pero, debido a esa popularidad, el Gobierno estadounidense ha restringido el acceso a los científicos y ha limitado los estudios sobre su estructura interna. Otro lugar en el que disfrutar del espectáculo es el desierto de Atacama, en Chile, donde brotan no menos de 80 géiseres, menores pero igual de ruidosos. Estos también ofrecen una oportunidad para sondear el funcionamiento interior de la Tierra. Hace poco, un equipo de geólogos estudió uno de ellos, apodado El Jefe, durante cinco días y más de 3500 erupciones: una cada 132 segundos. Como resultado, los expertos obtuvieron el conjunto de datos más completo hasta la fecha sobre estas explosivas coreografías de agua y vapor.

El Jefe erupciona con más regularidad que otros géiseres, pero su estructura interna es, a grandes rasgos, la misma. Un depósito de aguas subterráneas alimenta un estrecho canal que conduce a la superficie. A medida que el calor del interior de la Tierra se transmite al depósito, las burbujas de vapor atraviesan el agua y suben por el canal hasta que quedan atrapadas en una cámara lateral, una «trampa de burbujas». Cuando allí se acumula una cantidad suficiente de vapor, este escapa y, junto con agua, desborda la parte superior del géiser. Al final, las burbujas calientan el agua del canal hasta tal punto que esta hierve, lo que desata la erupción. La baja presión del agua que hierve en la parte superior desencadena una reacción que se propaga hacia abajo y que hace que el punto de ebullición de las aguas inferiores disminuya, con lo que el agua y el vapor de toda la columna salen disparados a la vez. El esquema adjunto muestra estas etapas y la subsiguiente recarga, producida cuando el líquido expulsado se filtra de nuevo hacia el depósito, en el modelo de laboratorio empleado por los investigadores. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de febrero en el *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*



EL GÉISER STROKKUR, en Islandia (*fotografía*), y el modelo de laboratorio empleado por los investigadores (*esquema*).

JONATHAN IRISH, GETTY IMAGES (*géiser en erupción*); FUENTE: «GEYSER PREPLAY AND ERUPTION IN A LABORATORY MODEL WITH A BUBBLE TRAP», ESTHER ADELSTEIN ET AL. EN *JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH*, VOL. 285, 15 DE SEPTIEMBRE DE 2014 (*modelo del ciclo del géiser*)

Las nuevas mediciones, efectuadas en un amplio intervalo de profundidades, permitirán conocer mejor el ciclo del géiser y sus pautas de ebullición, asegura Michael Manga, geólogo del proyecto e investigador de la Universidad de California en Berkeley. Los estudios anteriores habían determinado la presión o la temperatura, pero para entender el transporte de calor a través las aguas subterráneas resulta necesario conocer ambas magnitudes. Steven Ingebritsen, del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., se pregunta si esta imagen más completa del funcionamiento de un géiser servirá para entender otros fenómenos geotérmicos, como los volcanes, cuyo funcionamiento subterráneo resulta casi imposible de estudiar (los instrumentos de medición se fundirían). Ambos tipos de erupciones reciben energía del mismo flujo de magma. «Ellos han llevado sus instrumentos hasta donde era viable, pero aún nos preguntamos qué sucede a una profundidad aún mayor», señala el investigador.

—Sarah Lewin

MATERIALES

Lentes planas

Una vuelta de tuerca a las leyes de la óptica

Las lentes deben su nombre a su parecido con la lenteja, con la que comparten su forma ligeramente abombada. Sin embargo, tal vez las cámaras del futuro empleen lentes completamente planas. Hace tiempo que los físicos investigan la posibilidad de fabricar lentes bidimensionales que, aun sin redondeces, logren dispersar y torcer los rayos de luz.

En su búsqueda de teléfonos móviles que puedan enrollarse o caber en un monedero, los ingenieros han comenzado a estudiar el diseño de circuitos, baterías y pantallas flexibles. Sin embargo, un obstáculo más difícil de salvar se encuentra en las lentes de las cámaras, de apenas unos milímetros de espesor; sobre todo, en aquellos casos en los que son necesarias voluminosas lentes correctoras a fin de evitar imágenes borrosas.

En 2012, Federico Capasso, físico e ingeniero de Harvard, y sus colaboradores crearon una lente plana y ultrafina. Pese a no estar curvada, su lámina de vidrio enfocaba la luz gracias a unas rugosidades de silicio que, densamente dispuestas, desviaban la luz incidente en direcciones específicas. Sin embargo, solo funcionaba con un color y, además, con poca precisión.

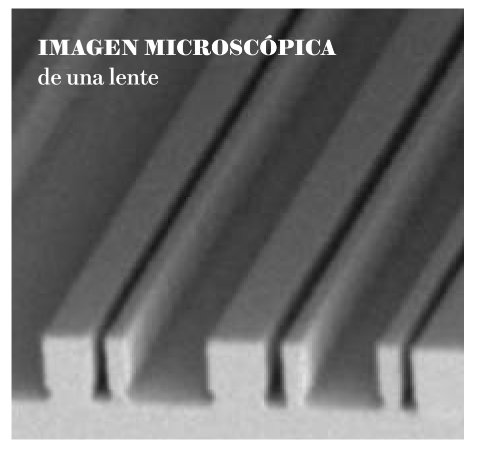


IMAGEN MICROSCÓPICA de una lente

Sin embargo, la última encarnación del dispositivo va más allá de una demostración de principios. Descrita el pasado mes de febrero en la edición en línea de la revista *Science*, enfoca a la perfección el rojo, el verde y el azul, por lo que permite obtener imágenes a todo color. Desde entonces los investigadores han fabricado un prototipo de mayor tamaño que, según Capasso, funciona justo como habían predicho.

Las nuevas lentes podrían reducir el volumen y el coste de equipos fotográficos, astronómicos y de microscopía, y tal vez resulte posible imprimirlas en láminas de plástico flexible para fabricar con ellas aparatos finos y borneadizos. Al respecto, los expertos ya han entablado contacto con Google y otras compañías tecnológicas. Según Bernard Kress, arquitecto óptico jefe de Google X, estas discretas lentes podrían emplearse en nuevos tipos de pantallas y sistemas de toma de imágenes más compactos y ligeros.

La única cuestión es: si no tienen forma de lenteja, ¿deberíamos seguir llamándolas lentes?

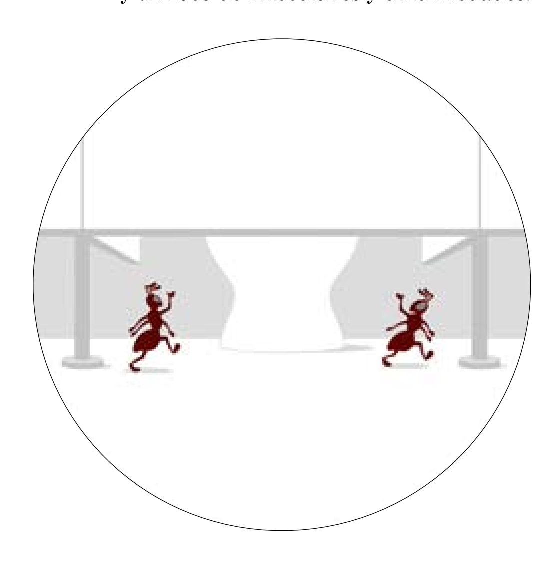
—Prachi Pratel

ETOLOGÍA

Aseos diminutos

Algunas hormigas construyen letrinas en sus hormigueros

A excepción de los escarabajos peloteros, la mayoría de los animales hace todo lo posible por evitar los excrementos. Los humanos construyen un cuarto entero destinado a su evacuación. Esta repugnancia obedece a un buen motivo: la materia fecal es un nido de bacterias y un foco de infecciones y enfermedades.



Como nosotros, muchos insectos coloniales adoptan medidas para garantizar la higiene en sus nidos y colmenas. Las abejas melíferas abandonan la colmena en vuelos defecatorios para hacer sus necesidades. Algunas hormigas, como las cortadoras de hojas, abonan con las heces los huertos de hongos nutricios, pero solo son manipuladas por cuadrillas de basureras. Las hormigas tienen una fama reconocida de pulcras, se deshacen de las compañeras muertas fuera del hormiguero y depositan las sobras alimentarias y otros desperdicios en cámaras especiales.

Así pues, el biólogo de la Universidad de Ratisbona Tomer J. Czaczkes no ocultó su sorpresa al percatarse de la acumulación de manchas oscuras en los rincones de los nidos de escayola donde vivían sus hormigas negras de jardín (*Lasius niger*). Más de siete años de observaciones le han convencido de que son pilas de heces.

Para confirmar sus sospechas, añadió un colorante artificial al alimento de 21 colonias de hormigas. Y, en efecto, las manchas oscuras comenzaron a lucir brillantes tonos rojizos y azulados. Las pilas de excremento de hormiga no contenían briznas de alimento, cadáveres ni otro tipo de desperdicios, por lo que Czaczkes y sus colegas llegaron a la conclusión de que las manchas debían corresponder por fuerza a «retretes». Los resultados se dieron a conocer el pasado febrero en *PLOS ONE*.

Nadie sabe con certeza por qué esta especie guarda las heces en el hormiguero, sobre todo si se tiene en cuenta que los miembros de la familia *Formicidae* son maníacos de la limpieza. Quizá se utilice como medio de defensa, demarcación del territorio o material de construcción. O podría servir como fuente de sal y otros nutrientes. Czaczkes aventura otra posibilidad: que las heces se almacenen precisamente por su fetidez. «Las hormigas distinguen los amigos de los enemigos por el olor. Tal vez las recién nacidas vayan al aseo y tomen una especie de baño para adquirir el olor de la colonia con rapidez». Todas estas explicaciones resultan factibles, por lo que se deberá seguir investigando para averiguar cuál es la mejor.

«El próximo paso consistirá en dedicar muchas horas de observación tediosa con la esperanza de sorprender a las hormigas en el aseo», afirma. Para poder mirar con discreción un momento tan íntimo, Czaczkes tendrá que construir hormigueros con trampillas transparentes y emplear luz roja, que las hormigas no pueden ver. Así es la entomología, en definitiva.

—Jason G. Goldman

CORTESÍA DE PATRICE GENEVET, FEDERICO CAPASSO Y FRANCESCO AIETA/ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS DE HARVARD (*lente*); THOMAS FUCHS (*hormigas*)

CIENCIA VEGETAL

Germinación controlada

Las plantas se aseguran de que las semillas germinen en el momento idóneo gracias a una memoria térmica

Mamá sabe lo que es mejor, aunque sea una planta. Un nuevo estudio ha revelado que *Arabidopsis*, una planta con flor, dota a sus semillas con el «recuerdo» de las temperaturas recientes a fin de prepararlas para las condiciones meteorológicas de la primavera incipiente.

En un experimento iniciado por fitogenetistas en Norwich, las plantas de esa especie que estuvieron expuestas a temperaturas cálidas generaron semillas que brotaron más rápido que otras expuestas a condiciones más frías, aunque las temperaturas cálidas precedieron en varias semanas a la formación de las semillas. Los investigadores, del Centro John Innes, un instituto de investigación vegetal, y de las universidades de York y Exeter, atribuyen esa diferencia a una proteína implicada en la floración. Con tiempo frío, la proteína induce a la planta progenitora a acumular taninos en sus frutos. Los taninos son compuestos que endurecen la cubierta de la semilla, por lo que una concentración elevada retrasa la germinación al dificultar su apertura y la emergencia de la nueva planta. «La planta progenitora decide el grado de dureza de la cubierta y controla así el nacimiento de la semilla», explica Steven Penfield, genetista del John Innes y uno de los autores del estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. En condiciones cálidas, la planta reduce ligeramente la concentración de proteínas para que la descendencia germine sin dilación y aproveche la bonanza.

Penfield subraya que el descubrimiento ha despertado el interés de científicos y empresas agrícolas por igual. El cambio climático está alterando la época de germinación de numerosas especies vegetales, y su trabajo sugiere que se podrían modificar los genes implicados en la percepción de las estaciones del año para cambiar el momento en que las semillas brotan, con independencia de las condiciones exteriores.

Persuadir a las plantas para que dejen de dictar a sus semillas cuándo deben germinar podría constituir un avance esencial para asegurar las cosechas de modo uniforme, afirma Kent Bradford, investigador agrícola de la Universidad de California en Davis, que está ansioso por comprobar si las lechugas regulan de modo similar la germinación. «Pretendemos adaptar esas poblaciones al entorno que previsiblemente imperará en diez o veinte años». —*Sarah Lewin*

MEDICINA

Recuperarse tras un ictus

Se ha demostrado que el hemisferio cerebral sano contribuye a restaurar el dañado

Nuevas revelaciones sobre los accidentes cerebrovasculares indican que el tratamiento del hemisferio cerebral no afectado resulta tan importante como el del tejido dañado, si se quiere acelerar la curación.

En los últimos años se ha comprobado que el lado indemne despliega una mayor actividad y puede ayudar al hemisferio perjudicado. A veces segrega proteínas que estimulan la reparación de las neuronas alteradas o desencadenan la formación de nuevos vasos sanguíneos. Incluso puede llegar a extender sus neuronas, de un lado a otro, para restaurar la función.

Los tratamientos actuales contra el ictus se centran sobre todo en el tejido dañado. «Debido a que el hemisferio opuesto ha salido bien parado, suele pensarse que es mejor no actuar sobre él», explica el neurólogo de la Universidad Stanford Gary Steinberg. Sin embargo, ante los crecientes indicios de que el hemisferio sano presta ayuda de forma natural, se investiga ahora cómo potenciar esa acción curativa. Uno de esos fármacos, auspiciado por Adviye Ergul, de la Universidad Regents de Georgia, y Susan Fagan, de la Universidad de Georgia, activa receptores del tejido indemne que ponen en marcha vías para reducir la inflamación nociva y sostener el crecimiento de las neuronas y de los vasos sanguíneos en el hemisferio donde se ha formado el trombo. El medicamento aumenta la velocidad de recuperación en las ratas afectadas por ictus, según han descrito hace poco en *Journal of Hipertension*. Ergul y Fagan afirman que el tratamiento podría estar disponible en el próximo lustro. —*Rebecca Harrington*

THOMAS FUCHS (*maíz*); MUSEO MOLINO PAPELERO DE CAPELLADES (*mujeres obreras*)

AGENDA

CONFERENCIAS

14 de mayo
Química a través del cristal
Martín Martínez Ripoll, Instituto de Química-Física Rocasolano, CSIC
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/museo/actividades

19 de mayo
La clave para vencer el cáncer: la metástasis
Roger R. Gomis, Instituto de Investigación Biomédica
Ciclo «*Cracks* de la investigación para fabricar el futuro»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

La mujer en el mundo industrial
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Tarrasa
www.mnactec.cat



Músicaconciencia
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logroño.es/casadelasciencias

OTROS

Del 5 al 10 de mayo
I Festival Nacional de Biodiversidad
La Orotava
Tenerife
www.festivalnacionalbiodiversidad.com

Del 18 al 20 de mayo - Festival
Pint of Science
Barcelona, Madrid, Murcia, Pamplona, San Sebastián, Santiago de Compostela, Valencia y Zaragoza
pintofscience.es

28 de mayo - Encuentro
Ciencia en redes
La Casa Encendida
Madrid
cienciaenredes.com

FÍSICA ESTADÍSTICA

La universalidad de los atascos

Un estudio halla que, en flujos «granulares» de todo tipo (desde partículas inertes hasta multitudes humanas), los taponamientos obedecen siempre las mismas leyes simples. Su conocimiento permite estimar a priori la eficiencia de las técnicas de evacuación

IKER ZURIGUEL Y ÁNGEL GARCIMARTÍN

En 2010, una consultora de ingeniería acudió a nuestro departamento de física y matemática aplicada de la Universidad de Navarra para solicitar ayuda. En una cantera se había taponado una chimenea de 200 metros de alto y 5 de diámetro por la que se dejaba caer el mineral. Las rocas habían formado un arco que obstruía el conducto, por lo que fue necesario emplear una carga explosiva para restablecer el flujo. Desde entonces, Diego Maza, uno de nuestros colegas del Laboratorio de Medios Granulares, ofrece recomendaciones para evitar tales percances.

Los atascos aparecen una y otra vez en nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, los granos de sal frecuentemente ocluyen los orificios de un salero, si bien en tales casos basta con agitar el recipiente para que el condimento vuelva a fluir. En general, los taponamientos se presentan en todas aquellas situaciones en las que se intenta hacer pasar por un lugar angosto un gran número de sólidos discretos, ya se trate de piedras, sal, animales o personas; en algunos casos, con consecuencias trágicas.

Sin embargo, hasta hace poco no existía una descripción unificada de tales fenómenos. En un trabajo reciente cuyos resultados aparecieron publicados hace unos meses en *Scientific Reports*, hemos demostrado que, en multitud de sistemas de todo tipo, la estadística de los taponamientos queda siempre regida por las mismas leyes simples. Conocerlas puede ser de gran ayuda para agilizar numerosos procesos, así como para diseñar sistemas de evacuación eficientes.

Nuestro estudio ha revelado que, en ciertos casos, el tiempo que duran los atascos (es decir, el tiempo durante el cual ningún cuerpo pasa por el estrechamiento) sigue una estadística «anómala», en la que el concepto de valor medio no se encuentra bien definido. Ello se debe a que hay una probabilidad no despreciable de que se produzcan sucesos extremos: atascos tremendamente largos —y de consecuencias potencialmente peligrosas— que hacen que la media diverja. El mismo formalismo se presta, además, a evaluar el efecto de diversos métodos de evacuación sin necesidad de experimentar en condiciones arriesgadas.







DE UNA DISTRIBUCIÓN DE OVEJAS... **El paso de un rebaño de ovejas por una puerta se analiza mediante una película grabada desde una posición cenital (*a*). La línea de color verde se muestrea a intervalos regulares para construir un diagrama espaciotemporal del paso de las reses (*b*), en el que el eje vertical representa el tiempo. Un atasco (*líneas amarillas*) se define como un intervalo temporal *t* durante el cual ningún animal franquea la puerta. Para reducir su duración pueden probarse diferentes procedimientos, como colocar un obstáculo delante de la puerta (*c*).**

Ovejas y leyes de potencias

Cada mañana, en una granja de Cubel, en Zaragoza, Tomás Yagüe abre la puerta de su establo para que un tropel de unas cien corderas entre a comer. Debido al ansia de las reses por franquear la puerta, se producen algunos empujones y atascos. Antes de dejarlas pasar, el ganadero tiene buen cuidado de encender las cámaras que hemos instalado en el recinto para filmar el paso de los animales. Elegimos estudiar el comportamiento de este rumiante porque guarda ciertas similitudes con las personas; en particular, un carácter gregario y una velocidad y tamaño parecidos.

Nuestro análisis consistió en registrar el momento en que cada res atravesaba la

puerta. Tras un estudio detallado, llegamos a la conclusión de que la cantidad más útil para caracterizar el proceso no era el tiempo que tardaban todos los animales en entrar en el recinto, sino el intervalo que mediaba entre el paso de dos ovejas consecutivas. La estadística de estos lapsos reveló que la probabilidad P de que un atasco durase un tiempo mayor que t decrecía de forma potencial: $P \sim t^{-\alpha}$, para cierto número α. En cambio, la efusión (el número de animales que traspasaban la puerta entre atasco y atasco) resultó quedar regida por una ley exponencial.

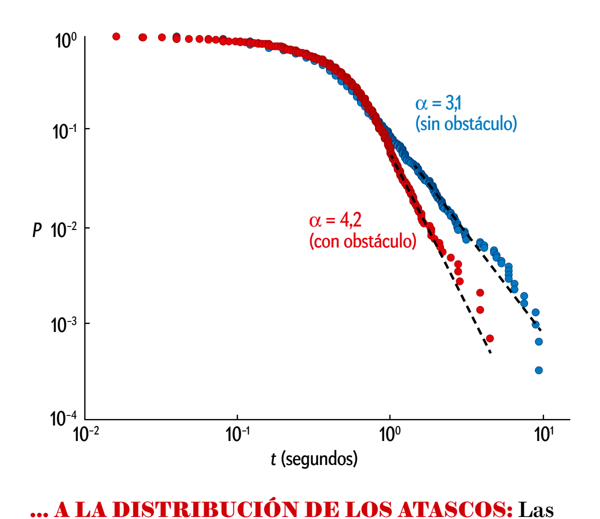
Al llevar a cabo la misma clase de mediciones en sistemas muy distintos, hemos observado que todos ellos obedecen las mismas leyes. El valor preciso del exponente α depende de las condiciones específicas de cada sistema, pero las leyes de potencias parecen ubicuas. Es en este sentido en el que decimos que dichas leyes son «universales».

Las diferencias entre una distribución exponencial y una potencial son más que notables. Las primeras arrojan siempre un valor medio (un «tamaño característico») bien definido y, por lo general, derivan de un mecanismo físico fácil de comprender. Las leyes de potencias, en cambio, suelen deberse a procesos más complejos, los cuales pueden dar lugar a sucesos extremos. Así pues, llegado el caso, podría predecirse con ciertas garantías cuán probable es que se produzca un atasco, pero no cuánto tiempo va a durar.

Las distribuciones potenciales no son raras. Entre otros ejemplos famosos, el número de habitantes de las ciudades o la magnitud de los terremotos siguen este tipo de leyes. En general, puede demostrarse que, si el exponente α es menor que 2, la media de la distribución no converge. En nuestro caso, ello implica que el concepto de tiempo medio de un atasco deja de tener sentido.

Este resultado reviste gran importancia práctica, ya que, a la hora de estudiar la seguridad de un recinto, medir el tiempo total de evacuación puede no ser suficiente. Ello se debe a que el tiempo que se tarda en despejar un local no proporciona cumplida información sobre la duración de los taponamientos que pueden producirse a la salida. Y, si bien al diseñar un recinto resulta lógico establecer un tiempo máximo de evacuación, con frecuencia las víctimas se producen por asfixia o aplastamiento en las salidas de emergencia. En tales casos, el aspecto clave es la duración de los atascos, no cuánto tiempo tardarán todas las personas en abandonar el local.

Hemos comprobado que nuestra descripción engloba desde las partículas inertes de los medios granulares, como la arena, hasta los rebaños de ovejas, pasando por las suspensiones coloidales. También se observa el mismo comportamiento en las simulaciones por ordenador, las cuales permiten estudiar situaciones que no pueden reproducirse en un experimento por el peligro que entrañan.



... A LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ATASCOS: Las gráficas muestran la probabilidad P de que un atasco dure un tiempo mayor que t. En escala logarítmica, una ley de potencias del tipo $P \sim t^{-\alpha}$ queda representada por una recta cuya pendiente proporciona el exponente α. Ello permite comparar el paso de un rebaño de ovejas en condiciones normales (*azul*) y con un obstáculo delante de la puerta (*rojo*). El aumento de la pendiente cuantifica la eficacia de la técnica: la probabilidad de que se dé un atasco de larga duración es menor con el obstáculo.

Agilizar el tránsito

Nuestro análisis proporciona una manera sencilla de evaluar las distintas medidas que pueden tomarse para reducir la probabilidad y la duración de los atascos. Una de ellas consiste en colocar un obstáculo poco antes de la salida. Contrariamente a lo que cabría pensar, este procedimiento aumenta el exponente α de la ley de potencias, y ello sin apenas variar el tiempo total de evacuación. Así pues, la efectividad de esta estrategia queda demostrada sin necesidad de llevar a cabo experimentos en circunstancias arriesgadas.

De todos los estudios realizados, se desprende que existen tres variables genéricas que gobiernan los atascos. La primera es un tamaño característico, dado por la proporción entre la angostura y los elementos que van a atravesarla: a mayor abertura, menor es la probabilidad de atasco. La segunda corresponde a la presión que experimenta el sistema (en el ejemplo del rebaño, el empuje que ejercen las ovejas), la cual tiende a aumentar tanto el tiempo de evacuación como la duración de los atascos. La tercera viene dada por la agitación de los elementos; en general —y al igual que ocurre en un salero— sacudirlos ayuda a restituir el flujo.

En la actualidad, en colaboración con César Martín, de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Navarra, estamos estudiando la evacuación de personas por una salida de emergencia; en particular, cómo se comportan cuando tratan de alcanzar la salida con diferente grado de competitividad. ¿Será beneficioso empujar para optimizar la evacuación? ¿Servirá un obstáculo para aliviar los atascos, como sucede con las ovejas? Las personas caminamos sobre dos piernas, por lo que nuestro equilibrio es más precario, y los resultados pueden variar. En cualquier caso, cabe esperar que esta investigación ofrezca valiosas sugerencias para mejorar la seguridad de locales concurridos.

—Iker Zuriguel y Ángel Garcimartín
Departamento de física
y matemática aplicada
Universidad de Navarra

PARA SABER MÁS

Simulating dynamical features of escape panic. D. Helbing, I. Farkas y T. Vicsek en *Nature*, vol. 407, págs. 487-490, septiembre de 2000.

Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. Iker Zuriguel et al. en *Scientific Reports*, vol. 4, 4324, diciembre de 2014. Disponible en **www.nature.com/articles/srep07324**

EN NUESTRO ARCHIVO

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.

GESTIÓN FORESTAL

Evolución del régimen de incendios forestales en España

La influencia de las variaciones climáticas, las actividades socioeconómicas y la gestión de los incendios

M.ª VANESA MORENO, EMILIO CHUVIECO Y GIANNI BORIS PEZZATTI

Los incendios constituyen un fenómeno natural y han ocurrido en la Tierra desde hace millones de años, poco después de la aparición de las plantas terrestres en el Silúrico. Para que se produzcan, se necesitan tres elementos: una fuente de calor, combustible y oxígeno. El comportamiento de un incendio depende de las características meteorológicas, del tipo de combustible y de la topografía, y sus efectos ecológicos varían de una comunidad vegetal a otra. Algunos ecosistemas son dependientes de los incendios (mediterráneos o sabana), otros son sensibles (tropicales sin estación seca) y otros son independientes (desiertos o tundra). El ecosistema mediterráneo no puede entenderse, pues, sin la consideración del fuego, ya que muchas de sus plantas exhiben una enorme resistencia ante él o incluso se ven favorecidas por la perturbación. Algunas, como el pino carrasco y la aliaga morisca, producen enormes cantidades de semillas cuya propagación o germinación es estimulada por el calor.

A principios de los años sesenta del siglo xx, los gestores de incendios y los ecólogos del fuego crearon el término «régimen de incendios» para referirse a las características promedio de los eventos. El concepto incluye distintas variables que explican la presencia y el impacto del fuego en un determinado ecosistema. De este modo, al definir el régimen de incendios de cierta zona se contemplan parámetros como la frecuencia e intensidad de los siniestros, su estacionalidad o la superficie afectada. El estudio del régimen de incendios resulta importante para su gestión y prevención, así como para determinar sus repercusiones en los ecosistemas forestales, un conocimiento especialmente relevante en la situación actual de cambio global.

Algunas plantas presentan rasgos que les permiten resistir a los incendios y están adaptadas a un determinado régimen de fuegos, como el alcornoque, que sobrevive a los incendios de superficie (los que no alcanzan las copas de los árboles) gracias a su gruesa corteza. Sin embargo, los cambios en el régimen pueden alterar la estructura y composición de la vegetación, que a su vez podrían repercutir en diferentes características de los ecosistemas, como la biodiversidad. Asimismo, la modificación en el régimen de incendios puede influir en el clima a través de la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

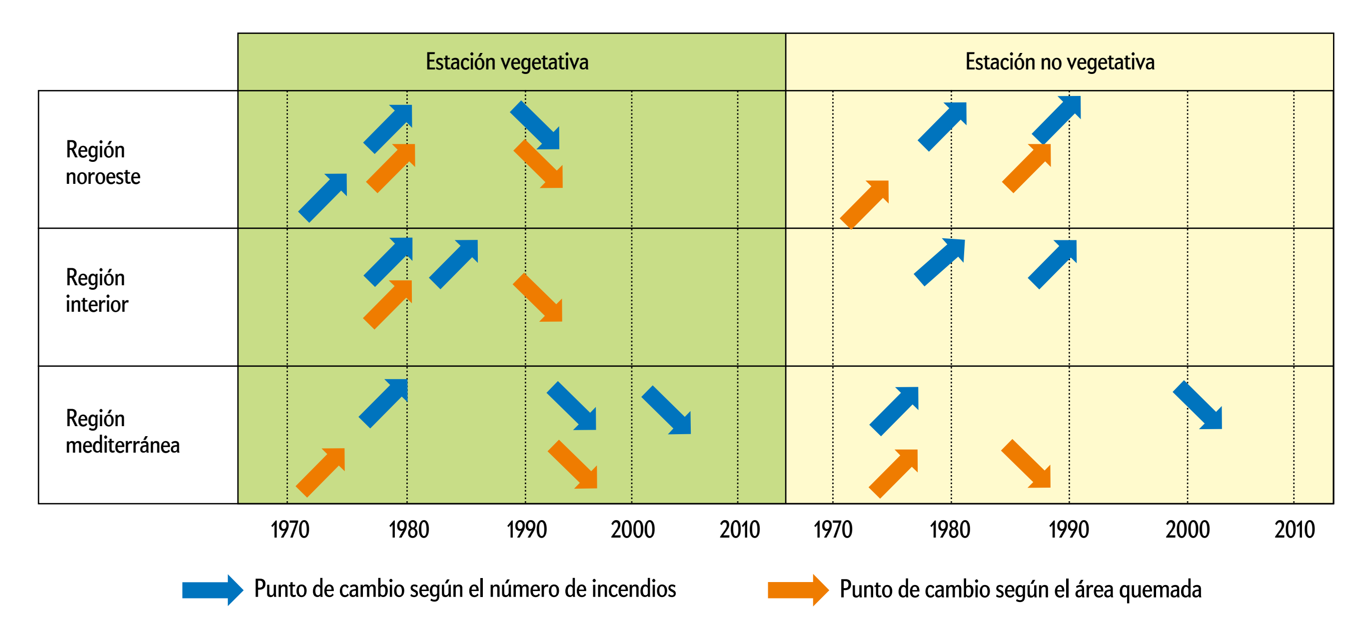
En este contexto, nuestro equipo se propuso averiguar cómo ha cambiado el régimen de incendios en España en los últimos decenios. En nuestro país, uno de los más afectados en Europa, se dispone de la base de datos estadística sobre incendios forestales más antigua del continente. Desde 1968, el organismo público encargado de esta cuestión, hoy representado por el Área de Defensa contra Incendios Forestales, del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, elabora los partes de incendio, en los que se anotan distintas variables referidas a cada evento.

Con nuestra investigación hemos comprobado que los regímenes de incendios de España son diversos y dinámicos, y guardan una estrecha relación con el clima, las actividades socioeconómicas y la gestión de incendios.

EL NÚMERO DE INCENDIOS Y LA SUPERFICIE QUEMADA **es superior en la estación vegetativa (de mayo a noviembre) en las tres regiones españolas analizadas, aunque la diferencia entre estaciones es mucho más marcada en la región mediterránea. En la gráfica se representa el valor medio mensual del número de incendios (mayor o igual a 1 hectárea, *líneas*) y la superficie quemada (*columnas*) durante el período 1968-2010.**

Puntos de cambio

Partiendo de la base de datos mencionada, hemos examinado la evolución en el número de incendios y la extensión quemada entre los años 1968 y 2010. Para ello, hemos realizado el análisis estadístico de puntos de cambio mediante el test no paramétrico *pettitt*, que permite detectar cuándo se produce un cambio estadísticamente significativo y la tendencia de este (ascendente, si el parámetro aumenta, o descendente, si disminuye). Nos hemos centrado en los incendios de superficie superior o igual a 1 hectárea y hemos diferenciado tres regiones del país según el clima: noroeste, interior y mediterránea. También se ha tenido en cuenta la estación en que se producían:



A LO LARGO DE LOS CUATRO DECENIOS ANALIZADOS, se han producido varios cambios de tendencia, o puntos de cambio, en el número de incendios (*flechas azules*) y la superficie quemada (*flechas rojas*). En los años setenta, se observa una tendencia general al alza de ambos parámetros. A partir de los años ochenta, los puntos de cambio varían según la estación y la región consideradas. En el gráfico se representan los puntos de cambio hallados en el análisis estadístico de los datos realizado con el test no paramétrico *pettitt*.

la vegetativa (de mayo a noviembre), en que las plantas se hallan activas, y la no vegetativa (de diciembre a abril). Esta distinción se llevó a cabo debido a la evidente diferencia entre ambas estaciones en la distribución de los incendios, la mayoría de los cuales se concentran en la época vegetativa.

El análisis de los datos ha revelado puntos de cambio ascendentes en todas las regiones y estaciones durante la década de los setenta, tanto para el número de incendios como para la superficie afectada; sin embargo, desde los años noventa hasta hace poco se han producido puntos de cambio descendentes. En ese tiempo el área quemada durante la estación vegetativa ha disminuido en las tres regiones. La mediterránea es la única donde se han reducido a la vez el número de incendios y el área quemada durante las dos estaciones.

En los años ochenta se observaron diferentes tendencias. Las regiones noroeste e interior presentaron un segundo punto de cambio ascendente en el número de incendios durante la estación no vegetativa, mientras que la región mediterránea presentó un punto de cambio descendente en el área quemada.

El papel del clima en los puntos de cambio ascendente de los años setenta es claro en las tres regiones durante la estación vegetativa. En estos años, coincidentes con un período de sequías, se produjo un incremento de la superficie forestal quemada debido a la acumulación del combustible de las tierras agrícolas abandonadas y no gestionadas, así como por las políticas de reforestación, basadas en la plantación de especies de crecimiento rápido y altamente inflamables destinadas a la industria del papel.

Los puntos de cambio ascendentes de la década de los setenta también coinciden con un incremento de la densidad de población humana en las zonas forestales de las tres regiones. En este período, además, el número de incendios intencionados aumentó en la región noroeste a causa del rechazo que levantaron las políticas de reforestación y la designación de áreas protegidas que afectaban a las tierras comunales.

Los puntos de cambio ascendentes en la década de los ochenta coinciden con un incremento en la densidad de ganado impulsada por políticas europeas que promocionaban una intensificación de este tipo de explotación. Tal actividad ha estado ligada tradicionalmente al uso del fuego, en especial en las regiones noroeste e interior.

La gestión de incendios llevada a cabo en las últimas décadas, caracterizada por una política de prevención y una mayor eficacia en la extinción, ha contribuido a los puntos de cambio descendentes en tiempo reciente, con una reducción en el número de incendios y el área quemada.

Gestión forestal sostenible

La diversidad y la dinámica de los regímenes de incendios implican la necesidad de diferentes estrategias de gestión adaptadas espacialmente y ajustadas a los valores socioeconómicos y ecológicos.

En las políticas de prevención, debe prestarse atención a cómo afecta la exclusión del fuego en el régimen de incendios. Muchas especies mediterráneas están adaptadas a esta perturbación, por lo que la modificación del régimen de incendios podría alterar distintos parámetros ecológicos. De este modo, la menor frecuencia de los eventos podría ocasionar cambios en la gravedad de estos y modificar la composición relativa de las plantas en las comunidades vegetales, lo que afectaría a la biodiversidad.

Una gestión del combustible adecuada, fundamentada en la ecología del fuego y que tenga en cuenta aspectos sociales, resulta fundamental para evitar incendios muy extensos y apoyar la supresión de estos en situaciones de riesgo extremo o cuando acontecen en múltiples focos.

En el presente estudio se ha puesto de manifiesto que una cuestión pendiente para conseguir una caracterización íntegra del régimen de incendios en España es la inclusión de otros parámetros en las

investigaciones, como la intensidad (temperatura alcanzada y duración) o gravedad (por ejemplo, el número de árboles muertos o el grado de afectación de las copas).

También resultan esenciales las investigaciones que tienen por objeto determinar el régimen de incendios apropiado para cada tipo de ecosistema, las cuales deberían tener como resultado una guía de medidas prácticas que sean de utilidad para los gestores. Y por último, deberán construirse modelos para predecir la respuesta del régimen de incendios a las modificaciones ambientales, muchas asociadas al cambio global, un aspecto de especial relevancia si deseamos conservar nuestros ecosistemas.

—M.ª Vanesa Moreno y Emilio Chuvieco
Grupo de Investigación en Teledetección Ambiental. Universidad de Alcalá
—Gianni Boris Pezzatti
Grupo de Investigación de Ecosistemas Insubricos. Instituto Federal Suizo de Investigación para el Bosque, la Nieve y el Paisaje WSL

PARA SABER MÁS

Fire regimes changes and major driving forces in Spain from 1968-2010. M. V. Moreno et al. en *Environmental Science & Policy*, vol. 37, págs. 11-22, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fuego y evolución en el Mediterráneo. Juli G. Pausas en *IyC*, agosto de 2010.

MATERIALES

Espumas superaislantes

A partir de nanocelulosa y otros compuestos naturales se ha obtenido un nuevo material nanoestructurado que ofrece aislamiento térmico y resistencia a la ignición

BERND WICKLEIN

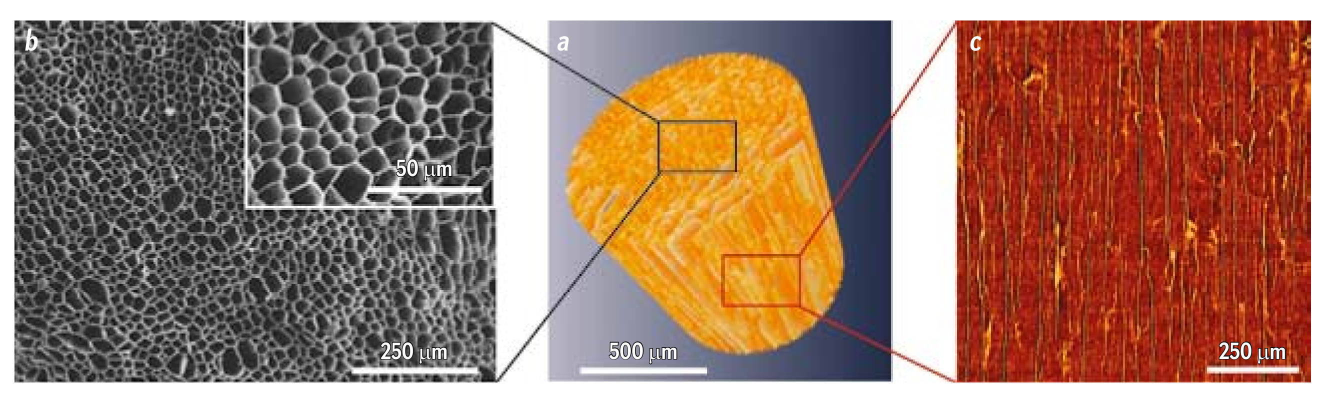
La climatización de los edificios supone más del diez por ciento del consumo energético mundial. Cualquier avance que contribuya a mejorar el aislamiento térmico constituye, por tanto, una buena herramienta para reducir el gasto en energía.

Con el propósito de avanzar en la obtención de nuevos aislantes, durante mi estancia posdoctoral en el departamento de química de materiales y ambiental de la Universidad de Estocolmo he participado en el desarrollo de un material que podría reducir drásticamente los costes de climatización de edificios y vehículos. Compuesto principalmente por celulosa, óxido de grafeno y arcillas nanoscópicas, el nuevo aislante es, además, resistente a la ignición por llama.

En la investigación, liderada por Lennart Bergström y Germán Salazar Álvarez, de la Universidad de Estocolmo, han colaborado también Andraž Kocjan, del Instituto Jozef Stefan de Liubliana, Federico Carosio y Giovanni Camino, del Instituto Politécnico de Torino, y Markus Antonietti, del Instituto Max Planck de Coloides e Interfases de Potsdam.

Los aislantes térmicos se utilizan para regular la temperatura. Operan como una barrera física que limita la transferencia de calor a través de fachadas, paredes, techos y pisos. La gran mayoría se obtiene a partir del petróleo; tiene, pues, un origen orgánico (pensemos en polímeros como el poliuretano o el poliestireno). Sin embargo, estos compuestos suelen ofrecer una capacidad aislante insuficiente para reducir el consumo energético. Se consideran buenos aislantes los materiales cuya conductividad térmica se halla por debajo de los 20 milivatios por milikelvin (mW/mK). Al aire le corresponden 24 mW/mK; al poliestireno y a la familia del poliuretano, valores de entre 25 y 45 mW/mK.

Además, esos polímeros suelen ser muy inflamables, por lo que se les añaden compuestos halogenados antiignición. Sin embargo, estos resultan muy tóxicos y corrosivos; una vez liberados en un incendio, pueden causar daños tanto en las



UNA ESTRUCTURA DE MACROPOROS TUBULARES constituye la base del nuevo material aislante (*a*, reconstrucción tridimensional de la espuma a partir de una microtomografía de rayos X). Estos poseen un diámetro de entre 10 y 20 micrómetros (*b*, corte transversal, imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido) y una longitud de varios milímetros (*c*, imagen obtenida por microtomografía de rayos X). Los componentes de las paredes de los poros son nanofibras de celulosa (77 %), nanoláminas de óxido de grafeno (10 %), nanofibras de sepiolita (10 %) y ácido bórico (3 %).

FUENTE: «THERMALLY INSULATING AND FIRE-RETARDANT LIGHTWEIGHT ANISOTROPIC FOAMS BASED ON NANOCELLULOSE AND GRAPHENE OXIDE», POR BERND WICKLEIN ET AL. EN *NATURE NANOTECHNOLOGY*, NOVIEMBRE DE 2014.

personas como en las instalaciones eléctricas. Urge, pues, hallar nuevos aditivos no inflamables e inocuos para la salud y el medio.

Ingredientes inocuos y renovables

En ese sentido, una estrategia que ha recibido gran atención se basa en la incorporación de partículas minerales (arcillas) o cerámicas (alúmina, sílice) en matrices poliméricas. En caso de fuego, estas partículas inorgánicas tienen la capacidad de crear, en la superficie del material aislante, barreras protectoras no volátiles. Cuando la matriz se calienta, ocurren dos cosas: por un lado, las partículas dispersadas difunden hacia la superficie; por otro, la parte superficial del polímero se degrada y evapora. De ello resulta una capa exterior cada vez más enriquecida en partículas cerámicas y no volátiles.

Además de utilizar aditivos antiignición que no resulten nocivos, también sería conveniente sustituir los polímeros constituyentes de las espumas aislantes de origen fósil por materiales con menor impacto ambiental. Aquí, la celulosa y demás compuestos derivados de la madera constituyen una alternativa interesante, debido a su carácter renovable y a sus interesantes propiedades mecánicas.

Las fibras de la celulosa están formadas por fibras más pequeñas (nanocelulosa), de unos 4 nanómetros de grosor, que son, de hecho, el constituyente básico de la madera. La nanocelulosa ofrece una elasticidad superior a la de muchos plásticos: presenta módulos de Young de alrededor de 130 gigapascales (GPa), frente a los 3 GPa del poliestireno o los valores entre 2 y 4 GPa del PVC. De hecho, es tan elástica como el acero o el Kevlar (material con el que se fabrican los chalecos antibalas), pero mucho más ligera (su densidad es de solo 1,5 gramos por centímetro cúbico, mientras que la del acero es de 7,8).

El interés por este material en los últimos cinco años ha crecido de forma notable; el número de artículos científicos ha aumentado casi de manera exponencial. Sus aplicaciones van desde agente de reforzamiento de plásticos, «nanopapel» (material transparente obtenido a partir de fibras de nanocelulosa) o aerogeles multifuncionales (que ofrecen varias funcionalidades a la vez, como propiedades magnéticas, eléctricas o térmicas).

El poder de la nanoestructura

Con la idea de utilizar un compuesto renovable (la madera) y aditivos antiignición no volátiles (partículas inorgánicas), en nuestro proyecto hemos optado por crear un nuevo material a base de nanofibras de celulosa y una combinación de nanoláminas de óxido de grafeno, nanofibras de sepiolita (un tipo de arcilla que conocía bien por los trabajos que realicé durante mi tesis doctoral en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid) y trazas de ácido bórico (relacionado con el mineral bórax). El resultado: una espuma superaislante, ultraligera y no contaminante.







EN ESTA SERIE DE FOTOS, tomadas antes del test (*a*), después de aplicar una llama durante 10 segundos (*b*) y después del test (*c*), se muestra el carácter ignífugo de la espuma.

CORTESÍA DEL AUTOR

El nuevo material presenta una conductividad térmica inferior a la del aire y otros aislantes de alto rendimiento como las espumas de poliestireno expandido (PEE) y los aerogeles de sílice. Además, a diferencia de las espumas de PEE y de las espumas de sílice, que son muy frágiles y no toleran esfuerzos mecánicos, la nueva espuma superaislante es ultraligera, no se quema bajo condiciones normales y es mecánicamente resistente.

La clave de las prestaciones térmicas reside en una estructura de macroporos tubulares, cuyas paredes están formadas por nanopartículas de diferente dimensionalidad (fibras y láminas). La orientación de los poros perpendicular a la fuente de calor dificulta la transmisión de calor, debido sobre todo a la dispersión fonónica. Los fonones son las vibraciones elásticas de los átomos o moléculas de un sólido que transmiten energía térmica a través del mismo. En los materiales con muchas interfases (como es el caso de nuestra espuma), estas ondas se dispersan, por lo que disminuye la conductividad térmica.

En resumen, la matriz de nanocelulosa y el óxido de grafeno son los responsables de la resistencia mecánica; la sepiolita y el ácido bórico contribuyen a formar la capa cerámica resistente al calor, y la estructura en poros reduce la conductividad térmica.

Del laboratorio a la fábrica

Nuestro siguiente objetivo consiste en lograr la escalabilidad del proceso de generación de las espumas. Es decir, aumentar el tamaño actual de las muestras, de unos pocos centímetros de espesor, a dimensiones habituales para paneles de aislamiento (entre 30 y 40 centímetros). El reto es aumentar el tamaño del material sin comprometer la microestructura interna del mismo, para que no pierda sus propiedades aislantes.

Asimismo, una aplicación industrial de estas nuevas espumas requeriría modificar el método de fabricación. Ahora se basa en la congelación controlada y direccionalizada (*freeze casting*), un proceso demasiado caro para llevarlo a cabo a gran escala.

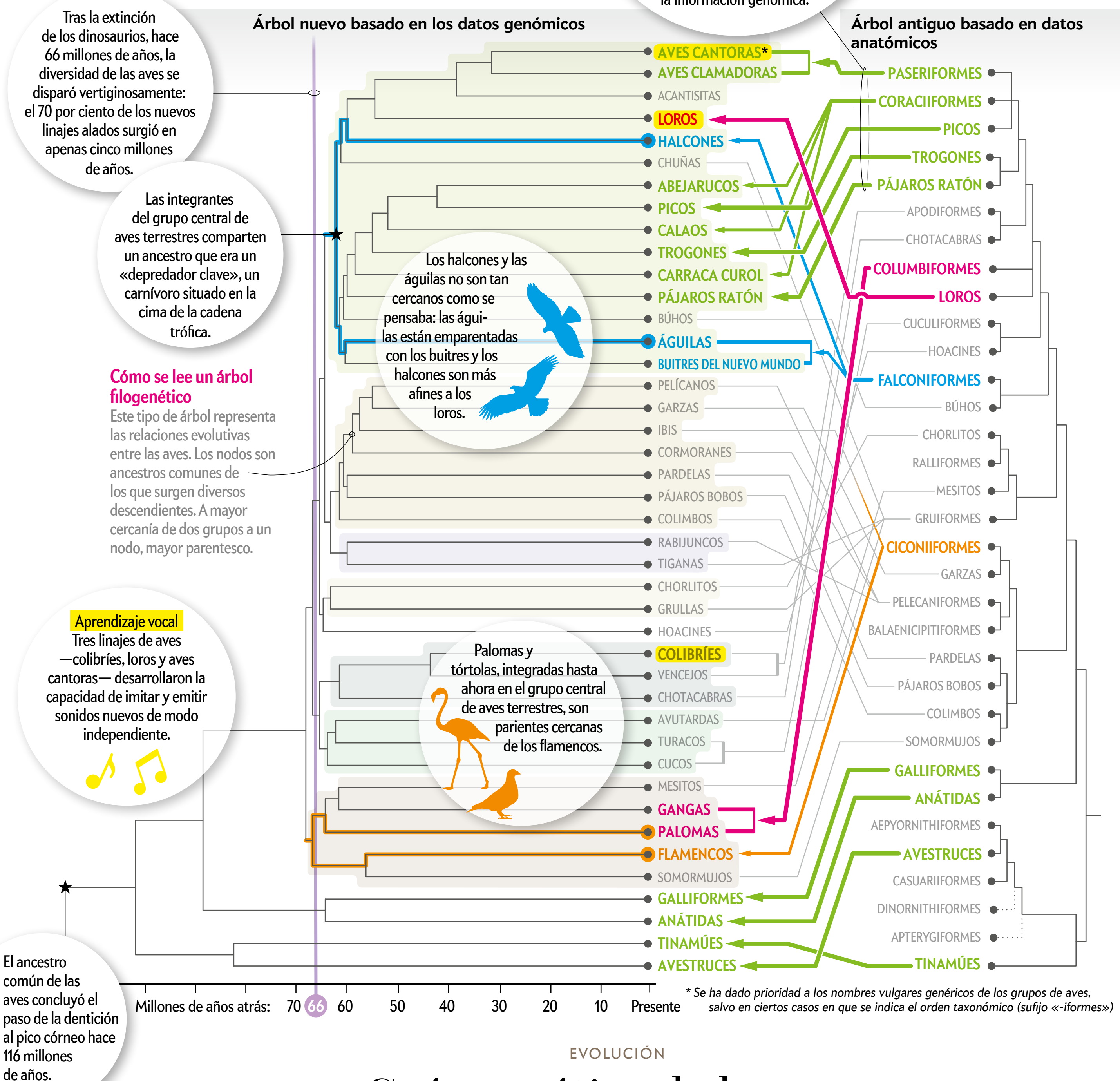
—Bernd Wicklein
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid

PARA SABER MÁS

Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. R. J. Moon et al. en *Chemical Society Reviews*, vol. 40, n.º 7, págs. 3941-3994, julio de 2011.

Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions. Properties, requirements and possibilities. B. P. Jelle en *Energy and Buildings*, vol. 43, n.º 10, págs. 2549-2563, octubre de 2011.

Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide. Bernd Wicklein et al. en *Nature Nanotechnology*, doi:10.1038/nnano.2014.248, noviembre de 2014.



*Se ha dado prioridad a los nombres vulgares genéricos de los grupos de aves, salvo en ciertos casos en que se indica el orden taxonómico (sufijo «-iformes»)

FUENTES: «WHOLE-GENOME ANALYSES RESOLVE EARLY BRANCHES IN THE TREE OF LIFE OF MODERN BIRDS», POR ERICH D. JARVIS ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 346, DICIEMBRE, 2014 (*árbol izquierdo*); «HIGHER-ORDER PHYLOGENY OF MODERN BIRDS (THEROPODA, AVES: NEORNITHES) BASED ON COMPARATIVE ANATOMY», VOL. II: «ANALYSIS AND DISCUSSION», POR BRADLEY C. LIVEZEY Y RICHARD L. ZUSI EN *ZOOLOGICAL JOURNAL OF THE LINNEAN SOCIETY*, VOL. 149, N.º 1, ENERO DE 2007 (*árbol derecho*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

EVOLUCIÓN

Guía genética de las aves

El árbol genealógico aviar se renueva

SARAH LEWIN

La clasificación de las aves en virtud del plumaje y de otros caracteres anatómicos ha servido bien a los científicos por espacio de siglos, pero ahora los análisis genéticos han desvelado todo un mundo de detalles sobre los lazos familiares de estos vertebrados. Un equipo internacional acaba de elaborar un árbol genealógico basado en el genoma completo de 48 especies, las cuales son representativas de los principales linajes de aves. Corresponde al estudio genético más minucioso realizado hasta la fecha de una rama principal del árbol de la vida. Este esfuerzo ingente, con más de 200 colaboradores, incluye investigaciones sobre la aparición y desaparición de la dentición, el origen del aprendizaje vocal y la cronología de la diversificación aviar.

El nuevo árbol confirma observaciones precedentes, como el ancestro común del grupo central de aves terrestres. También resuelve algunos vínculos controvertidos. ¿Quién habría imaginado, por ejemplo, que las palomas y los flamencos son primos cercanos?

—Sarah Lewin

EVOLUCIÓN HUMANA

LA MENTE NEANDERTAL

Los estudios anatómicos, genéticos y arqueológicos arrojan luz sobre la forma de vida de nuestros enigmáticos primos evolutivos

Kate Wong

EN SÍNTESIS

La visión tradicional sobre los neandertales les atribuía una posición menos evolucionada en capacidades cognitivas respecto a la que ocupa el *Homo sapiens* anatómicamente moderno.

Los estudios muestran que los neandertales diferían de *H. sapiens* en su anatomía cerebral y en su ADN, pero ignoramos el significado funcional de tales diferencias.

Los restos culturales proporcionan abundante información sobre el pensamiento de los neandertales y han reducido la brecha que se suponía que existía entre ellos y nosotros.

Los hallazgos señalan que otros motivos no relacionados con la inteligencia provocaron la extinción de los neandertales y permitieron que *H. sapiens* prosperara.

GIORDANO POLINI



Kate Wong es redactora de *Scientific American*.

Un día claro en Gibraltar, desde la cueva de Gorham puede divisarse la accidentada costa del norte de Marruecos alzándose sobre un mar de color turquesa. En el interior de la cueva reina la calma y solo se oye el murmullo de las olas chocando contra la playa rocosa. Pero, en alta mar, el estrecho que separa el extremo sur de la península ibérica del continente africano bulle de actividad. Los barcos pesqueros sondean las aguas en busca de atunes y peces aguja, los cruceros llenos de turistas navegan frente al enorme macizo calcáreo de Gibraltar y los buques petroleros transportan crudo desde el Mediterráneo hacia el Atlántico. Las rápidas corrientes, ricas en nutrientes, el clima templado y su privilegiada ubicación han atraído a los humanos a este lugar desde hace milenios.

Un grupo destacado de ellos se asentó en esta región durante decenas de miles de años, resistiendo a diversas glaciaciones. En esas épocas frías, el nivel del mar era más bajo y dejaba expuesta una vasta llanura frente a la cueva, un terreno donde prosperaban una gran variedad de animales y plantas. Esos individuos explotaban con eficacia los generosos recursos que ofrecía su entorno. Cazaban animales de gran tamaño, como la cabra montesa y las focas, y otros más pequeños, como conejos y palomas; pescaban doradas y recogían mejillones y lapas en las orillas alejadas; o recolectaban piñones de los árboles cercanos. En ocasiones, cazaban cuervos y águilas para adornarse con sus hermosas plumas negras. Y también grabaron en la pared de la cueva símbolos cuyo significado se ha perdido en el tiempo.

En todos esos aspectos, tales seres se comportaban igual que nuestros antepasados *Homo sapiens*, quienes se originaron en África, con la misma anatomía que poseemos hoy en día, y terminaron por colonizar todos los rincones del planeta. Pero los habitantes de Gibraltar no formaban parte de esos humanos anatómicamente modernos. Eran neandertales, unos parientes nuestros corpulentos y con unas características cejas prominentes que vivieron en Eurasia hace entre 39.000 y 350.000 años. El mismo nombre de «neandertal» se ha considerado en la cultura popular sinónimo de idiotez y brutalidad.

La base científica que sustenta esa idea peyorativa tiene un origen antiguo. En el año 1900, con el descubrimiento del primer esqueleto casi completo de un neandertal en el yacimiento de La Chapelle-aux-Saints, en Francia, se empezó a construir esta imagen del grupo: las diferencias anatómicas y las deformidades, que ahora se sabe que responden a la avanzada edad del individuo, fueron interpretadas como signos de degeneración e infrahumanidad.

Desde entonces, la opinión de los paleoantropológos se ha movido como un péndulo y ha oscilado entre aquellos que consideran a los neandertales cognitivamente inferiores a *H. sapiens* y los que los ven con las mismas capacidades mentales. En los últimos años se han realizado numerosos descubrimientos que alimentan de nuevo este debate. Algunos análisis de ADN antiguo sugieren que el cerebro de los neandertales era realmente diferente y menos capaz que el de *H. sapiens*. Sin embargo, cada vez hay más pruebas arqueológicas que indican que en muchos aspectos esos seres se comportaban de modo similar a sus contemporáneos humanos anatómicamente modernos.

A medida que las investigaciones sobre la mente neandertal avanzan, el misterio sobre su desaparición tras reinar durante cientos de miles de años se va haciendo más profundo. En la actualidad, los esfuerzos se concentran en resolver el enigma de su extinción. Tal conocimiento ayudará a entender en qué se distinguía *H. sapiens* del resto de la familia humana y qué le permitió iniciar el camino que le llevó a convertirse en la especie de enorme éxito que es hoy.

INDICIOS EN LOS FÓSILES

Durante mucho tiempo, los paleoantropólogos han buscado pistas en los cráneos fósiles para establecer las capacidades cognitivas de los neandertales. El estudio del interior de la cavidad craneal permite reconstruir la morfología externa del cerebro de un humano extinto, la cual revela su tamaño total y la forma de algunas de sus regiones. Pero este tipo de análisis no ha logrado establecer las diferencias principales entre el cerebro de los neandertales y el de *H. sapiens*. Ralph Holloway, paleoneurólogo de la Universidad de Columbia, afirma que el de los neandertales era un poco más aplanado que el nuestro, pero presentaba igual tamaño; de hecho, en algunos casos era más voluminoso. Y, a juzgar por la impresión que dejaron en el interior del cráneo, los lóbulos frontales (que se encargan, entre otras tareas, de la resolución de problemas) eran casi idénticos a los de *H. sapiens*. Sin embargo, las marcas internas no revelan la forma o la estructura interna de esas importantes regiones. Holloway admite que «los moldes endocraneales constituyen la prueba más directa de la evolución del cerebro, pero resultan insuficientes a la hora de ofrecer una información sólida sobre el comportamiento».

En un estudio publicado en 2013, Eiluned Pearce, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores consiguieron sortear algunas de las limitaciones de los moldes endocraneales y hallaron una manera de estimar el volumen de las áreas cerebrales. El equipo utilizó las medidas de la órbita ocular para deducir el tamaño de la corteza visual, encargada de procesar las señales visuales. Descubrieron que los neandertales presentaban unas órbitas más grandes que los humanos modernos, por lo que deberían poseer también una corteza visual más amplia. Según una hipótesis, este rasgo tal vez les ayudaría a arreglárselas con la escasa luz solar de la que disponían en las altas latitudes donde vivían. Se argumentó entonces que si destinaban una parte

mayor del cerebro a procesar la información visual, contarían con menos tejido neural para otras regiones, entre ellas las que nos ayudan a mantener redes sociales extensas, una capacidad ventajosa en tiempos difíciles.

Sin embargo, a Holloway no le convencen esos razonamientos. Sus estudios de los moldes endocraneales indican que no hay manera de delimitar y medir la corteza visual. El rostro de los neandertales es más amplio que el de los humanos anatómicamente modernos y ello explicaría por qué las cuencas de sus ojos son más espaciosas. Además, los humanos actuales muestran una gran variabilidad en la proporción que ocupa la corteza visual respecto a otras regiones del cerebro, una variabilidad anatómica que no parece corresponderse con diferencias conductuales.

Otros análisis de fósiles han ofrecido igualmente datos equívocos acerca de la mente de los neandertales. Los estudios sobre la asimetría de las extremidades y las marcas que aparecen en sus herramientas, así como en los dientes (tal vez por agarrar con ellos objetos como pieles), indican que eran tan diestros como nosotros. Nuestra especie se distingue de los chimpancés en que tendemos a emplear con mayor frecuencia la mano derecha. Este rasgo guarda relación con asimetrías en el cerebro que pueden asociarse al empleo del lenguaje, un elemento clave de la conducta humana moderna. Sin embargo, estudios sobre la forma del cráneo de los neandertales en diferentes etapas del desarrollo indican que estos alcanzarían su gran tamaño cerebral mediante un proceso distinto al de *H. sapiens*. Aunque en el vientre materno su cerebro empezara a formarse de modo parecido al de los humanos modernos, después del nacimiento, durante un período crítico para el desarrollo cognitivo, su crecimiento seguía una pauta distinta.

Tales diferencias en el desarrollo quizá tengan profundas raíces evolutivas. El análisis de 17 cráneos de 430.000 años de antigüedad hallados en el yacimiento de la Sima de los Huesos, en Atapuerca (Burgos), demuestra que los miembros de esta población antepasada de los neandertales presentaban un cerebro más reducido que el de sus descendientes. Este hallazgo indica que los neandertales no heredaron su gran tamaño cerebral del último ancestro común de neandertales y humanos modernos. El proceso evolutivo de expansión del cerebro se produjo después y de forma paralela en ambas especies. Aunque el cerebro neandertal adquirió unas dimensiones similares a las del nuestro, su evolución independiente habría dado numerosas oportunidades para la aparición de otras diferencias más sutiles que el tamaño global, como las que afectan a la conectividad.

DATOS GENÉTICOS

En los análisis de ADN pueden entreverse algunas de estas desemejanzas. Desde 2010, cuando se publicó el borrador del genoma de los neandertales, los genetistas han indagado en el ADN antiguo para determinar en qué se distinguían los neandertales de *Homo sapiens*. Curiosamente, poseían una variante muy similar de un gen nuestro, *FOXP2*, que se ha asociado al habla y al lenguaje de los humanos actuales. Sin embargo, en otras partes, el genoma de los neandertales difiere del nuestro de forma notable. Por un lado, parece que contenía variantes distintas de otros genes implicados en el lenguaje, entre ellos *CNTNAP2*. Además, de los 87 genes de los humanos modernos que son claramente distintos de los genes homólogos en los neandertales y otros homínidos arcaicos (los denisovanos), algunos se hallan implicados en el desarrollo y función del cerebro.

Pero no todo puede explicarse por las disimilitudes en el genoma entre ambos homínidos. La activación y desactivación de determinados genes pudo también diversificarse. De este modo, ambos grupos se distinguirían por la cantidad y las circunstancias en que sintetizaban las sustancias codificadas por sus genes. De hecho, el propio gen *FOXP2* parecía expresarse de forma diferente en neandertales y *H. sapiens*, aunque la proteína que producía era la misma. Se ha empezado a estudiar la regulación génica en los neandertales y otros humanos extintos mediante el examen de unos marcadores químicos, los grupos metilo, en los genomas antiguos. Se sabe que estos marcadores influyen en la actividad de los genes.

Pero la gran pregunta consiste en saber si esas diferencias en las secuencias de ADN y en la actividad de los genes se traducirían en diferencias cognitivas. Algunos datos intrigantes proceden del estudio de personas actuales que poseen un pequeño porcentaje de ADN neandertal como resultado de un cruzamiento lejano entre neandertales y *H. sapiens*.

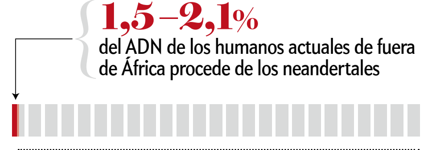
El genetista John Blangero, del Instituto de Investigación Biomédica de Texas, dirige un estudio a largo plazo con numerosas familias de San Antonio que tiene como objetivo determinar los genes implicados en enfermedades complejas como la diabetes. En los últimos años, él y su equipo han comenzado a analizar la estructura y la función cerebral de los participantes del estudio. Blangero, formado como bioantropólogo, se planteó cómo podría utilizar las personas actuales para responder a preguntas tales como cuáles eran las capacidades cognitivas de los neandertales.

Su plan tomó forma. Durante el transcurso de sus investigaciones sobre enfermedades, había obtenido secuencias de todo el genoma y resonancias magnéticas del cerebro de cientos de pacientes. Además, había desarrollado un método estadístico para medir las repercusiones, en rasgos observables, de determinadas variantes génicas vinculadas a enfermedades. Se le ocurrió que con este método podría emplear el genoma neandertal y los datos genéticos y las resonancias magnéticas de humanos actuales para estimar los efectos que tendría en la cognición la presencia de las variantes neandertales.

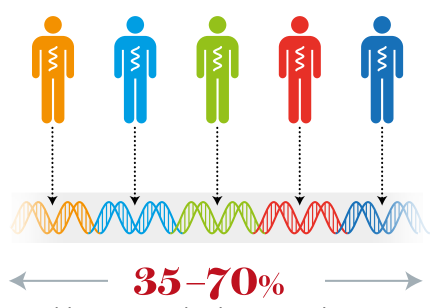
Sus resultados sugieren que varias regiones cerebrales clave eran más reducidas en los neandertales que en

La herencia neandertal

El análisis del ADN recuperado en diversos fósiles de neandertales indica que estos homínidos se hibridaron con *Homo sapiens* después de que este último abandonase África. Como resultado de este antiguo cruce, numerosos humanos actuales conservan un pequeño porcentaje de ADN neandertal.



Cada individuo de nuestra especie posee solo una pequeña parte de ADN neandertal. Pero no todos conservamos los mismos fragmentos. De hecho, si juntamos los correspondientes a un grupo numeroso de personas actuales, puede llegar a reconstruirse entre el 35 y el 70 por ciento del genoma neandertal.

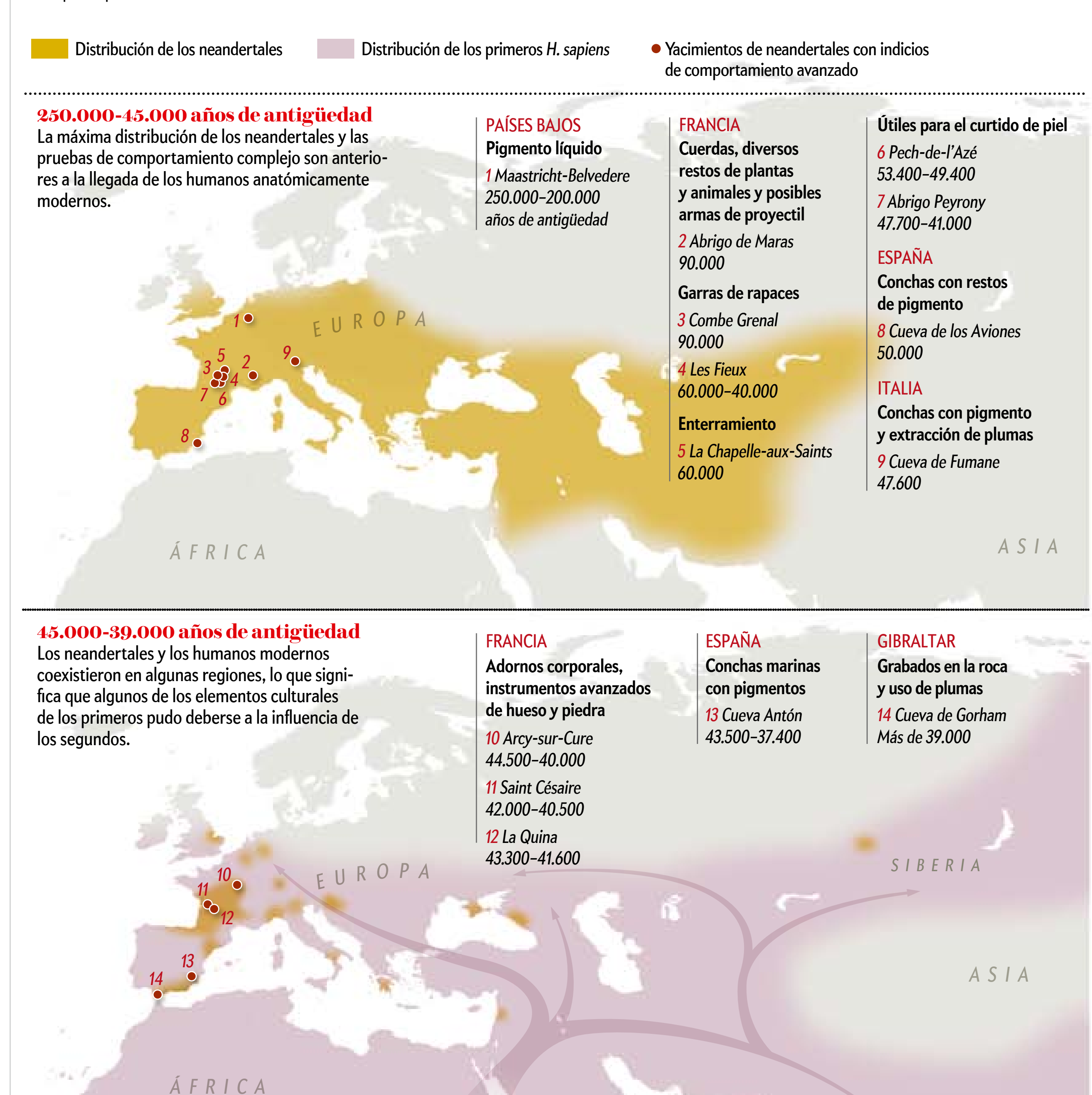


35–70%
del genoma neandertal persiste en el acervo génico de los humanos actuales

5W INFOGRAPHICS

Convivencia de dos especies

Los neandertales dominaron Eurasia durante centenares de miles de años hasta que los humanos anatómicamente modernos invadieron su territorio. Entonces los primeros se extinguieron. Algunos expertos han propuesto que los neandertales cedieron ante *H. sapiens* porque no poseían lenguaje ni las mismas capacidades sociales, eran tecnológicamente menos avanzados y explotaban peor los recursos alimentarios. Cualquier atisbo de complejidad en los yacimientos arqueológicos de neandertales se atribuía a la influencia de *H. sapiens*. Estudios recientes que han datado con precisión numerosos yacimientos europeos permiten documentar la extinción de los neandertales e indican que estos se solaparon con *H. sapiens* durante varios miles de años. Ello amplía el intervalo en que los neandertales habrían aprendido conocimientos de los intrusos. Pero durante los últimos años se han descubierto numerosas pruebas (objetos simbólicos, instrumentos muy avanzados y una gran variedad de restos alimentarios) que demuestran que la complejidad de los neandertales apareció claramente antes de la llegada de *H. sapiens*. Se plantea ahora la pregunta de si los recién llegados eran sencillamente mejores en ese tipo de comportamientos o si hubo otros factores que provocaron la extinción de los neandertales.



FUENTE: «THE TIMING AND SPATIOTEMPORAL PATTERNING OF NEANDERTHAL DISAPPEARANCE», POR TOM HIGHAM ET AL. EN *NATURE*, VOL. 512, 21 DE AGOSTO, 2014 (*distribución neandertal*); 5W INFOGRAPHICS (*mapas*)

H. sapiens, entre ellas el área de la sustancia gris superficial (que ayuda a procesar la información), el área de Broca (que parece estar implicada en el lenguaje) y la amígdala (que controla las emociones y la motivación). Los datos también indican que los neandertales presentarían menos sustancia blanca, lo que se traduciría en una menor conectividad cerebral. También hallaron otros rasgos que habrían menguado su capacidad para aprender y recordar palabras. «Los neandertales eran casi seguro menos aptos en el plano cognitivo», afirma Blangero.

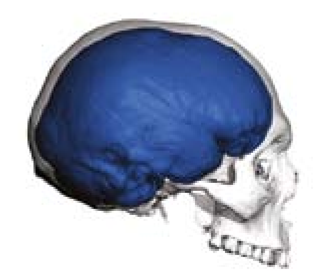
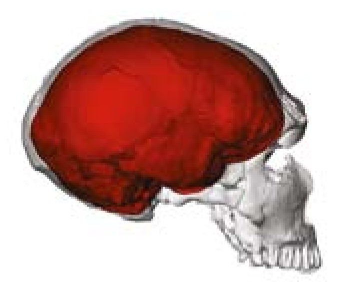
Por supuesto, al no haber sobrevivido los neandertales, el experto no puede realizar pruebas sobre su cognición que confirmen o refuten sus inferencias. Pero habría otra manera de verificar su hipótesis. Gracias a nuestros avances tecnológicos, podría estudiarse la función de neuronas neandertales mediante la introducción de secuencias de ADN neandertal en células humanas actuales. Al ser programadas para convertirse en neuronas, podría observarse esas células «neandertalizadas» en placas de Petri y examinarse su capacidad para transmitir impulsos eléctricos, migrar a diferentes regiones del cerebro y desarrollar proyecciones (neuritas) que permiten la comunicación celular. Blangero observa que, aunque habría que considerar los problemas éticos de la creación de células neandertales, el trabajo ayudaría a identificar los genes implicados en los trastornos cerebrales de los humanos actuales. Determinar los cambios genéticos que alteran la función de las neuronas facilitaría el descubrimiento de nuevas terapias.

No todo el mundo cree que puedan extraerse conclusiones sobre la mente de los neandertales a partir del ADN. John Hawks, de la Universidad de Wisconsin-Madison, indica que los neandertales quizá presentaran otras variantes genéticas que influyeron en su función cerebral, pero, al no existir su equivalente en las personas actuales, no podemos compararlas entre sí. Señala que, si se quisiera predecir el color de la piel de los neandertales basándose en los genes que ellos y los humanos modernos tenían en común, se llegaría a la conclusión de que su piel era oscura. Sin embargo, se sabe que los neandertales poseían unos genes, hoy desaparecidos, que probablemente aclaraban su piel. Pero, según Hawks, el principal problema de averiguar el funcionamiento del cerebro neandertal a partir de los genes reside en el gran desconocimiento que hay sobre el efecto de los diferentes genes en el pensamiento de nuestra propia especie.

RESTOS ARQUEOLÓGICOS

Dadas las limitaciones de la anatomía fósil y el hecho de que la investigación sobre el ADN antiguo se halle todavía en su infancia, muchos científicos creen que los registros arqueológicos que estos humanos extintos dejaron tras de sí nos proporcionan las pistas más claras sobre la mente de los neandertales. Durante mucho tiempo, ese registro no ofrecía una imagen muy halagüeña sobre nuestros primos evolutivos. Los primeros europeos modernos dejaron a su paso muestras de arte, herramientas complejas y restos de comida que acreditan una capacidad de explotar una enorme variedad de animales y plantas, lo que les permitió adaptarse a nuevos ambientes y fluctuaciones climáticas. En cambio, los neandertales parecían carecer de arte u otros elementos simbólicos, sus herramientas eran más simples y se les atribuía una estrategia de alimentación basada solo en la caza mayor. Según esta idea, estaban tan fijados en su propia forma de vida que no pudieron adaptarse al deterioro de las condiciones climáticas y a la superioridad de los modernos invasores.

No obstante, en la década de los noventa los arqueólogos comenzaron a hallar pruebas que contradecían esa idea. Aparecieron diversos objetos de tipo decorativo y herramientas complejas que fueron atribuidas a los neandertales. Desde entonces, se ha debatido sobre si tales artículos los inventaron realmente ellos, como algunos reivindican. Esta duda ha surgido porque los objetos corresponden al período final de la dinastía neandertal, en un momento en que *H. sapiens* ya ocupaba la misma zona. Los humanos anatómicamente modernos llegaron a Europa hace entre 44.000 y 41.500 años, cientos de miles de años después de que los neandertales se estableciesen allí. Algunos escépticos creen que *H. sapiens* elaboró estos artefactos avanzados y más tarde se mezclaron con otros restos de los neandertales. O bien que los neandertales habrían copiado los inventos de los humanos modernos o robado alguno de sus utensilios.

LA FORMA DEL CEREBRO DE UN NEANDERTAL (*derecha*) era distinta a la de un humano actual (*izquierda*), pero aún desconocemos cómo ello podía influir en su modo de pensar.

DE «A UNIQUELY MODERN HUMAN PATTERN OF ENDOCRANIAL DEVELOPMENT: INSIGHTS FROM A NEW CRANIAL RECONSTRUCTION OF THE NEANDERTAL NEWBORN FROM MEZMAISKAYA», POR PHILIPP GUNZ, SIMON NEUBAUER, LUBOV GOLOVANOVA, VLADIMIR DORONICHEV, BRUNO MAUREILLE Y JEAN-JACQUES HUBLIN EN *JOURNAL OF HUMAN EVOLUTION*, VOL. 62, N.º 2, FEBRERO 2012

Pero esta opinión es cada vez más difícil de sostener, ya que numerosos descubrimientos realizados en los últimos años ponen de manifiesto que los neandertales desarrollaron estas capacidades antes de que los humanos anatómicamente modernos llegasen y se extendiesen por toda Europa. «Ha habido un cambio real. Cada mes nos trae un nuevo y sorprendente hallazgo sobre los neandertales» comenta David Frayer, de la Universidad de Kansas, y las pruebas apuntan siempre a que eran más inteligentes de lo que se pensaba.

Algunos de los descubrimientos más sorprendentes revelan que su estética y pensamiento abstracto se desarrolló antes de la llegada de *H. sapiens*. Entre ellos, se incluyen el grabado y los indicios del uso de plumas en la cueva de Gorham. Artefactos de esta naturaleza han aparecido en yacimientos arqueológicos de toda Europa. En la Cueva de Fumane, en la región italiana de Véneto, los arqueólogos han encontrado pruebas del uso de plumas y una concha de caracol fósil; recogida al menos a cien kilómetros de distancia del yacimiento, había sido teñida de rojo y utilizada en un colgante, hace al menos 47.600 años. En la cueva de los Aviones y en la cueva Antón, en Murcia, también se han hallado conchas marinas con restos de pigmento. Algunas parecen haber servido de cuencos para mezclar y contener pigmentos rojos, amarillos y negros que tal vez se empleaban como cosméticos. Otras, de al menos 50.000 años de antigüedad, tienen perforaciones que hacen pensar que sirvieron de adornos corporales.

Otros restos dejados por los neandertales nos informan que su pasión por la estética se remonta aún más lejos. En yacimientos de Francia e Italia se ha documentado que hace entre 40.000 y 90.000 años coleccionaban garras de águila. Las marcas de corte que se observan en los huesos indican que su objetivo consistía en extraer estas de los animales y no la carne. Tal hallazgo llevó a la conclusión de que los neandertales cazaban las águilas no para comérselas, sino por motivos simbólicos, probablemente para adornarse con sus impresionantes garras.





EN LAS CUEVAS DE GIBRALTAR (*arriba*) **vivieron neandertales muy avanzados. Un grabado hallado en la pared de una de estas cuevas** (*derecha*) **indica que presentaban pensamiento de tipo simbólico.**

DAVID LIITTSCHWAGER, *NATIONAL GEOGRAPHIC* (*cueva*); CORTESÍA DE STEWART FINLAYSON, MUSEO DE GIBRALTAR (*grabados en la cueva*)

Indicios aún más antiguos sobre la estética neandertal proceden del yacimiento de Maastricht-Belvedere, en los Países Bajos, donde los arqueólogos han encontrado pequeñas manchas de ocre rojo (óxido de hierro) en depósitos que datan de hace entre 200.000 y 250.000 años. El pigmento rojizo había sido finamente molido y mezclado con un líquido que luego goteó sobre el suelo. No se sabe con seguridad qué estaban haciendo los neandertales con el líquido, pero una posibilidad obvia es que lo utilizaran como pintura corporal. De hecho, cuando aparece ocre rojo en los primeros yacimientos de humanos modernos, los investigadores suponen que se empleaba con fines decorativos.

Estos nuevos descubrimientos, además de ofrecernos una imagen más brillante de nuestros primos tan difamados, proporcionan una información crucial sobre la mente de los neandertales. Durante mucho tiempo, los arqueólogos han considerado que el arte, incluido el adorno corporal, constituye un claro indicador de las capacidades cognitivas de tipo moderno, ya que demuestra una aptitud para concebir algo abstracto y convertir esa información en símbolos. Nuestra forma de comunicación a través del lenguaje se basa en el pensamiento simbólico. Este es uno de los rasgos distintivos de los humanos modernos y se considera fundamental en el éxito de nuestra especie. Si los neandertales pensaban de forma simbólica, como así parece, entonces tal vez también poseían lenguaje. De hecho, el pensamiento abstracto pudo haber aparecido en el linaje humano antes incluso del último antepasado común de los neandertales y *Homo sapiens*. En diciembre de 2014, se descubrió una concha de mejillón en Indonesia con un dibujo geométrico que habría sido grabado por un antepasado más primitivo, *Homo erectus*, hace unos 500.000 años.

El pensamiento simbólico no es el único rasgo de la conducta que habría ayudado a *H. sapiens* a prosperar. La elaboración de herramientas para un uso específico es otra de las habilidades que también parecían dominar los neandertales. En 2013, Marie Soressi, de la Universidad de Leiden, en los Países Bajos, y sus colaboradores anunciaron el descubrimiento de herramientas de hueso conocidas como «alisadores» en dos yacimientos neandertales de la Dordoña francesa, de entre 41.000 y 53.000 años de antigüedad. Estos instrumentos son empleados hoy por los curtidores para aumentar la flexibilidad, brillo e impermeabilidad de las pieles. A juzgar por las marcas de desgaste en los artefactos, los neandertales los utilizaron con el mismo propósito. Construyeron los alisadores con costillas de ciervo, tras redondear el extremo del hueso que se conecta con el esternón. Utilizaban la herramienta presionando oblicuamente la punta sobre una piel seca, empujándola por la superficie varias veces para alisar y suavizar el cuero.

Otras pruebas de la inteligencia de los neandertales proceden del yacimiento de Abrigo de Maras, en el sur de Francia, donde vivieron hace alrededor de 90.000 años. Bruce Hardy, del Colegio Kenyon, y sus colaboradores han realizado el análisis microscópico de la superficie de los útiles líticos del yacimiento y han descubierto diferentes tipos de actividades que en otro tiempo se habrían atribuido a una especie superior. En concreto, encontraron restos de fibras vegetales trenzadas que habrían sido utilizadas para la fabricación de hilos o cuerdas, con las que podrían haberse construido redes, trampas y bolsas. También hallaron indicios del procesamiento de la madera, lo que sugiere que los neandertales elaboraban herramientas con ese material.

Los análisis de residuos desmienten la idea de que los neandertales solo consumían un tipo de alimento. El estudio de la composición química de los dientes, junto con el análisis de los restos de animales recuperados en yacimientos, señalan que, además de capturar presas grandes y peligrosas, como el mamut y los bisontes, también comían una gran variedad de animales, según su disponibilidad, igual que hacían los humanos anatómicamente modernos. Los neandertales de Abrigo de Maras parece que habrían cazado una gran colección de animales, incluidos algunos rápidos y pequeños, como conejos y peces. Una capacidad que se consideraba fuera del alcance de los neandertales, con su tecnología menos avanzada.

Algunos investigadores opinan que la aptitud para comer vegetales dio a *H. sapiens* una ventaja sobre los neandertales, ya que le permitía aprovechar más recursos en una misma superficie de terreno. (En comparación con otros primates, a los humanos nos resulta más difícil subsistir solo a base de plantas



ESTE INSTRUMENTO DE HUESO que servía para curtir la piel (aquí fotografiado desde cuatro ángulos) es uno de los objetos complejos que construyeron los neandertales.

CORTESÍA DE SHANNON P. McPHERRON, COPYRIGHT PROYECTO ABRIGO PEYRONY

porque nuestro cerebro voluminoso demanda calorías en abundancia. Asimismo, nuestro reducido sistema digestivo está mal adaptado para procesar grandes cantidades de vegetales crudos. La combinación de estos rasgos hace necesario un conocimiento profundo de las plantas comestibles y del modo de prepararlas.) Sin embargo, los neandertales de Abrigo de Maras recogían especies como la chirivía y la bardana, así como setas comestibles. Y no eran los únicos que lo hacían.

Según el estudio liderado por Amanda Henry, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, los neandertales de una amplia franja de Eurasia, desde Irak a Bélgica, se alimentaban de plantas muy diversas. Tras examinar el sarro de sus dientes y los residuos de sus herramientas de piedra, la investigadora determinó que consumían unas plantas estrechamente emparentadas con el trigo y la cebada y que las cocinaban para que fuesen más nutritivas. También halló restos de almidón de tubérculos y compuestos químicos procedentes de dátiles. Las similitudes con los hallazgos de yacimientos de humanos modernos resultan llamativas. «Todos los datos que hemos obtenido nos llevan a afirmar que no hubo diferencias notables entre ambos grupos», comenta Henry. Los primeros humanos modernos en Eurasia no aprovechaban mejor los alimentos vegetales que los neandertales.

UNA LARGA DESPEDIDA

Pero si los neandertales exhibían un comportamiento que se considera propio de los humanos anatómicamente modernos, el cual favoreció su progreso y dispersión por el mundo, entonces el declive y la extinción de los neandertales despierta aún mayor desconcierto. ¿Por qué desaparecieron mientras que *H. sapiens* sobrevivió? Una hipótesis propone que este último disponía de herramientas más diversas, lo que aumentaba su rendimiento en la obtención de recursos. Henry explica que evolucionó en África, donde el tamaño de su población era mayor que la de los neandertales. Con más bocas que alimentar, algunos recursos disminuyeron y habría tenido que desarrollar nuevas herramientas para aprovechar otros tipos de alimento. Cuando llevó estas técnicas avanzadas de África a Eurasia, logró explotar el entorno de modo más eficaz que los propios neandertales. En otras palabras, los humanos modernos perfeccionaron su supervivencia y sus habilidades en condiciones más limitantes que aquellas a las que se habían enfrentado los neandertales y, cuando se introdujeron en su territorio, mostraron ventajas sobre ellos.

El gran tamaño de la población de *H. sapiens* no solo funcionó como un acicate para la innovación, también ayudó a mantener las nuevas tradiciones vivas y a que no desaparecieran con el último representante de un grupo reducido y aislado. Los numerosos miembros de *H. sapiens,* más conectados entre sí, «incrementaban y hacían más eficiente las posibilidades de mantener y aprovechar los conocimientos en comparación con los humanos anteriores, incluidos los neandertales», opina Chris Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres. Sin embargo, la llegada de los humanos modernos no provocó la extinción inmediata de los neandertales. En un estudio reciente, Thomas Higham, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores han intentado averiguar el momento de su desaparición. Con métodos de datación mejorados han establecido las edades de decenas de yacimientos europeos de los últimos neandertales y de los primeros humanos modernos, de España a Rusia. Los resultados indican que los dos grupos convivieron en el continente durante unos 2600 a 5400 años, antes de que los neandertales desapareciesen por completo, hace unos 39.000 años.

Esa coexistencia tan prolongada habría permitido que durante mucho tiempo ambos grupos se hubiesen hibridado entre sí. Los análisis de ADN han encontrado que las personas que hoy en día viven fuera de África poseen un promedio de entre el 1,5 a 2,1 por ciento de ADN neandertal. Una herencia que es producto del cruce entre neandertales y humanos anatómicamente modernos hace decenas de miles de años, después de que este último grupo se dispersase fuera de África.

Para algunos expertos, la mezcla entre una población pequeña de neandertales con otra de mayor tamaño tal vez llevara a su desaparición, al verse su acervo génico inundado por el de *H. sapiens*. «Los neandertales nunca fueron muy abundantes y continuamente llegaba gente de otras regiones que se mezclaba con ellos, así que finalmente se desvanecieron», conjetura Frayer. «La historia explica que todas las formas vivientes terminan por extinguirse», añade. «Ello no significa necesariamente que fuesen poco inteligentes, o culturalmente incapaces, o inadaptados. Simplemente, es lo que suele suceder.»

PARA SABER MÁS

Brain development after birth differs between neanderthals and modern humans. Phillip Gunz et al. en *Current Biology*, vol. 20, n.º 21, págs. R921-R922, noviembre de 2010.

Impossible neanderthals? Making string, throwing projectiles and catching small game during marine isotope stage 4 (Abri du Maras, France). Bruce L. Hardy et al. en *Quaternary Science Reviews*, vol. 82, págs. 23-40, diciembre de 2013.

A rock engraving made by neanderthals in Gibraltar. Joaquín Rodríguez Vidal et al. en *Proceedings of the National Academy of the Sciences USA*, vol. 111, n.º 37, págs. 13.301-13.306, septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un ejemplo de cultura neandertal. Joao Zilhao y Francesco D'Errico en *IyC*, junio de 2000.

La extinción de los neandertales. Kate Wong en *IyC*, octubre de 2009.

¿Pensaban los neandertales como nosotros? Kate Wong en *IyC*, agosto de 2010.

Las raíces de los neandertales. Carlos Lorenzo en *IyC*, noviembre de 2014.

ECOLOGÍA

Mutualismos entre plantas y animales en las islas

Las características singulares del medio insular propician unas interacciones entre especies distintas a las del continente y más frágiles ante las amenazas del cambio global

Anna Traveset y Manuel Nogales

EN SÍNTESIS

En las islas se establecen unas interacciones peculiares entre las plantas y los animales que las polinizan y dispersan, las cuales constituyen un elemento más de la biodiversidad insular.

Muchas de esas asociaciones sufren en la actualidad la amenaza de los distintos motores de cambio global, especialmente el de las especies invasoras.

El conocimiento en profundidad de los mutualismos insulares resulta fundamental en la prevención de perturbaciones en el futuro, así como en la elaboración de proyectos de restauración.



Anna Traveset es profesora de investigación del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, un centro mixto del CSIC y la Universidad de las Islas Baleares, en Mallorca. **Manuel Nogales** es investigador científico del Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, del CSIC, en Tenerife. Ambos estudian los procesos mutualistas en ambientes insulares, así como los aspectos relacionados con su conservación. Su labor se centra en las Baleares y Canarias, aunque también se extiende al resto de las islas macaronésicas y Galápagos.

Las islas siempre han fascinado a los naturalistas, además de a muchos viajeros deseosos por descubrir paisajes espectaculares en los que se mezclan tierra y mar. ¿Por qué esa fascinación? Una de las razones es que, debido a sus circunstancias particulares (origen, aislamiento, historia, orografía, biota), constituyen «laboratorios naturales» en los que pueden constatarse, quizá con mayor facilidad que en el continente, distintos procesos evolutivos. De ahí que, desde las primeras expediciones naturalistas del siglo XVIII, las islas hayan atraído a biogeógrafos, biólogos evolutivos y ecólogos. No es por casualidad que Darwin se inspirara en las Galápagos al desarrollar su teoría de la selección natural, ni tampoco que su compatriota Wallace, considerado padre de la biogeografía (disciplina que estudia la distribución de los seres vivos sobre la Tierra), lo hiciese paralelamente en el archipiélago malayo.

La investigación insular ha promovido la aparición de numerosos conceptos teóricos centrales en distintas disciplinas científicas, como la vulcanología, la biogeografía, la evolución o la ecología. En esta última, muchas de las ideas desarrolladas con respecto a islas «reales» (porciones de tierra rodeadas de agua) son perfectamente aplicables al estudio de las «islas-hábitat» continentales (cimas de montañas, fragmentos de bosque, lagos), y gran parte de los hallazgos obtenidos en las islas pueden aprovecharse para formular hipótesis sobre procesos biológicos generales.

Aquí nos limitaremos a las islas «reales», cuyo número total aún se desconoce, aunque se acerca al millón si consideramos también aquellas que se encuentran en lagos. Solo en Indonesia existen más de 17.000, casi la mitad de las cuales carecen de nombre, y más de 6000 ni siquiera están habitadas. Las islas constituyen un 5 por ciento de la tierra emergida en el planeta. Además, en ellas vive un 10 por ciento de la población humana (600 millones de personas) y se localiza un cuarto de los estados soberanos del mundo.

Las islas, en particular las oceánicas (las que nunca han estado en contacto con masas continentales), albergan también gran parte de la biodiversidad del planeta y muchas de ellas son consideradas puntos calientes (*hot spots*) de biodiversidad, con una elevada cantidad de endemismos, es decir, especies que solo se hallan allí. Las interacciones que se establecen entre las especies constituyen un componente más de esta biodiversidad. Debido a sus características intrínsecas, los ecosistemas insulares presentan interacciones peculiares, sobre todo relaciones entre plantas y animales que no se hallan en otros lugares y cuyo origen quizá se remonte a varios millones de años. Se trata a menudo de interacciones mutualistas, en las que dos especies (o más) se benefician mutuamente, como las que existen entre las plantas y sus polinizadores o sus dispersores de semillas.

Por desgracia, gran parte de esa diversidad y de las interacciones entre especies se hallan amenazadas por los distintos mo-



AVES POLINIZADORAS. Las plantas insulares a menudo establecen interacciones con vertebrados oportunistas que necesitan complementar su dieta debido a la relativa escasez de recursos que hallan en las islas. De este modo, aves que en el continente son típicamente insectívoras o granívoras, como los pinzones, en las islas consumen también néctar y polen, con lo que actúan como polinizadores. En la imagen, un pinzón de Galápagos (*Geospiza fortis*) poliniza las flores de varias especies de chumbera (*Opuntia*) endémicas de estas islas.

CABO FORMENTOR, MALLORCA/THINKSTOCK/angiii (*páginas anteriores*); RUBEN HELENO (*pinzón*)

tores de cambio global, en especial la introducción de especies exóticas invasoras, que van desplazando progresivamente a las nativas y alteran sus relaciones mutualistas. Se estima que el 80 por ciento de las extinciones conocidas desde tiempos históricos (aproximadamente desde el año 1600 d.C.) hasta la actualidad corresponden a especies insulares.

El conocimiento en profundidad de los mutualismos insulares resulta fundamental a la hora de prever y evitar perturbaciones en el futuro, y puede ayudar a elaborar planes de conservación y restauración de los ecosistemas de estas regiones.

ESPECIES COLONIZADORAS

Una de las características destacables de la biota de las islas es su disarmonía, es decir, su diferente proporción de taxones en comparación con el continente más cercano. Ello se debe, básicamente, a las diferencias que existen entre especies en cuanto a su capacidad de dispersión, esto es, a la posibilidad que tienen de desplazarse hasta las islas. Además, las tasas de especiación son distintas en uno u otro medio. Así, ciertos grupos taxonómicos, como los anfibios, los mamíferos terrestres no voladores, algunas aves (como los tucanes o los pájaros carpinteros) o varios grupos de invertebrados (como los himenópteros) se hallan ausentes o bien son muy raros en muchas islas oceánicas. Este hecho ha condicionado sobremanera el tipo de interacciones entre plantas y animales que han podido evolucionar en ellas.

Las plantas superiores y los reptiles son los grupos taxonómicos mejor estudiados en los ecosistemas insulares. Estos incluyen más de 35.000 especies de plantas superiores, lo que supone más del 13 por ciento de todas las descritas en el mundo. La proporción de las que son endémicas suele ser muy alta. Destacan archipiélagos como Hawái (con un 90 por ciento de plantas endémicas), Nueva Zelanda (82 por ciento) o Nueva Caledonia (80 por ciento).

Entre los reptiles se cuentan también numerosas especies exclusivas de una única isla, como el 60 por ciento de los reptiles terrestres de la isla de Mona o el mismo porcentaje de eslizones en las islas del Pacífico tropical. Incluso es posible hallar géneros endémicos enteros, como es el caso de *Gallotia*, lagartos que solo medran en las Canarias, o el de *Cyclura*, iguanas de roca de las Antillas Mayores. Otros grupos taxonómicos presentan también un alto grado de endemicidad, como las aves de las islas del Pacífico tropical (con cerca de un 66 por ciento de representantes) o los insectos de Canarias, las islas del Pacífico tropical o Hawái.

Aparte de esas peculiaridades con respecto a la diversidad de especies, existen las relacionadas con su abundancia. En las islas hay una sobrerrepresentación de reptiles como consecuencia de la escasez de competidores y depredadores. Las particularidades en la composición y abundancia de la fauna y flora insulares tienen implicaciones directas en el tipo e intensidad de los mutualismos entre plantas y animales.

La disarmonía en la composición de la biota constituye una clara indicación de la existencia de un filtro para las especies que disponen de sistemas adecuados de dispersión a larga distancia. Los principales mecanismos que utilizan las plantas para colonizar islas remotas son la anemocoria (dispersión de semillas con el viento), la exo y la endozoocoria (a través de animales, por vía externa e interna, respectivamente) y la talasocoria (mediante flotación en el mar).

En el caso de los animales, la migración puede ser aérea o marina, y tanto de manera activa (organismos con capacidad de realizar vuelos largos o de desplazarse por el agua) como pasiva (transportados por huracanes o ciclones, o bien mediante balsas flotantes, como troncos de árboles). Obviamente, la separación entre el continente y la isla, la intensidad y frecuencia de los diversos fenómenos meteorológicos y las características intrínsecas de cada organismo van a condicionar quién llegará y quién no. A menudo deben salvar enormes distancias: varios análisis realizados en las islas Hawái, alejadas 3650 kilómetros del continente americano, demuestran que lo han logrado grupos taxonómicos dispares, aunque con distinto éxito.

Las aves constituyen el principal vector de propagación de las plantas hacia las islas, por lo que determinan en gran medida la composición de las comunidades vegetales que se establecen en ellas. De este modo, cerca del 90 por ciento de las especies de angiospermas del archipiélago de Juan Fernández han llegado mediante ornitocoria, esto es, a través de aves. La dispersión protagonizada por murciélagos y aves ha sido también la responsable del establecimiento de cerca del 30 por ciento de las angiospermas en la isla Krakatoa (Indonesia). En Nueva Zelanda, un 70 por ciento de las plantas leñosas produce frutos carnosos y, a su vez, un 70 por ciento de las aves forestales nativas son frugívoras (consumen frutos).

POLINIZADORES INSULARES

Existen importantes diferencias entre islas y continentes en la diversidad de polinizadores y en la frecuencia de sus visitas a las flores. La gran disarmonía en la biota insular se refleja bien en la fauna de polinizadores. Abundan los insectos de pequeño tamaño (moscas, escarabajos, avispas o mariposas nocturnas), posiblemente porque su llegada al nuevo medio ha sido facilitada por los vientos fuertes. Por el contrario, los insectos con probóscide larga, especialmente las abejas, están pobremente representados.

La abeja de la miel (*Apis mellifera*), polinizador muy común e importante en el continente, está ausente en la mayoría de las islas oceánicas debido, supuestamente, a su limitada capacidad dispersiva. Pero en las numerosas islas donde ha sido introducida para el aprovechamiento de la miel, sus colonias (que pueden constar de unos 70.000 individuos) pueden tener efectos catastróficos sobre la ya depauperada fauna de polinizadores insulares. Unas cuantas colmenas pueden superar en número a la comunidad entera de polinizadores nativos de una pequeña isla. Para muchas de las plantas que visita, la abeja de la miel compite por los recursos con los polinizadores autóctonos (incluso con aves), aunque puede no ser tan efectiva como estos.

En las islas es frecuente observar vertebrados que ejercen una función relevante como polinizadores. Dentro del grupo de las aves destacan nectarívoros clásicos, como colibríes, suimangas y aves melífagas, pero también se alimentan de néctar algunas especies oportunistas que en el continente consumen exclusivamente insectos u otros alimentos, como frutos o semillas. Así lo hemos demostrado en un estudio sobre los pinzones de Galápagos. Al visitar las flores, estas aves transfieren el polen de una planta a otra, un mecanismo que resulta relevante en aquellas especies que sufren escasas visitas de insectos.

Los reptiles, como lagartos, lagartijas y gecos, son también polinizadores habituales en numerosos archipiélagos del mundo. En ocasiones incluso polinizan con mayor eficacia que los insectos, según hemos observado en la planta *Euphorbia dendroides* en Baleares.

Por último, existen murciélagos nectarívoros (como *Pteropus*) estrictamente oceánicos. Se hallan en abundancia en algunas islas del Pacífico, donde desempeñan un importante papel: en Samoa, el 30 por ciento de los árboles depende total o parcialmente de estos animales para su polinización o dispersión. Algu-

nos de estos murciélagos poseen incluso caracteres adaptados al consumo de néctar, como cambios en la morfología de la lengua o en la talla corporal.

La mayoría de las interacciones de polinización no son específicas, esto es, la relación entre dos organismos no se establece de modo exclusivo. A ello contribuye la abundancia de plantas y polinizadores supergeneralistas, los cuales interactúan con un gran número de especies. Este alto grado de generalización se debe principalmente a la pobreza de especies en las comunidades insulares.

Los organismos supergeneralistas suelen facilitar el asilvestramiento de otros introducidos de modo más reciente en la comunidad y que pueden convertirse más tarde en invasores. Así lo hemos verificado en estudios llevados a cabo en Baleares, Canarias y Galápagos.

La abeja de la miel, los abejorros y las abejas carpinteras son notables polinizadores supergeneralistas, además de varios escarabajos e incluso hormigas; algunos vertebrados, como los gecos de isla Mauricio (*Phelsuma*), polinizan asimismo un gran número de plantas. En la mayoría de las comunidades suele destacar

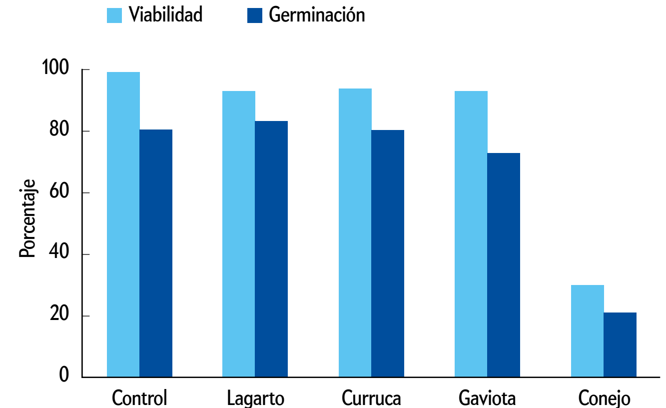
PROPAGACIÓN DE SEMILLAS

Dispersores nativos más eficaces

La reproducción de numerosas plantas en las islas depende a menudo de lagartos y aves, muy abundantes en ellas. Los animales se alimentan de los frutos de las plantas y ejercen de dispersores al propagar las semillas a través de sus excrementos.

Un ejemplo característico lo ofrece el tasaigo (*Rubia fruticosa*), una planta endémica de las islas macaronésicas cuyos frutos son consumidos por varios animales. Entre ellos se encuentran especies nativas como el lagarto endémico de Canarias (*Gallotia galloti*, *a*) y la curruca capirotada (*Sylvia atricapilla*, *b*), y también especies introducidas por los humanos, como el conejo. Sin embargo, no todos tienen el mismo efecto sobre *R. fruticosa*. Tal y como se muestra en la gráfica, las especies nativas son dispersores más eficaces, puesto que apenas alteran la viabilidad y la capacidad de germinación de las semillas de esta planta.





Efecto de la digestión
El procesamiento digestivo de los dispersores nativos (lagarto, curruca y gaviota) apenas altera la viabilidad (proporción de embriones vivos) y la capacidad de germinación (proporción de semillas germinadas) de la planta *Rubia fruticosa*, si se compara con las de semillas no consumidas por ningún animal (grupo de control). En cambio, el consumo de estas por el conejo sí las afecta negativamente.

FUENTE: «EFFECT OF NATIVE AND ALIEN VERTEBRATE FRUGIVORES ON SEED VIABILITY AND GERMINATION PATTERNS OF *RUBIA FRUTICOSA* (RUBIACEAE) IN THE EASTERN CANARY ISLANDS»; POR M. NOGALES ET AL. EN *FUNCTIONAL ECOLOGY*, N.º 19, PÁGS. 429-436, 2005 (*gráfica*)

BENEHARO RODRÍGUEZ Y NICOLÁS MARTÍN (*lagarto y curruca*)

también alguna especie vegetal cuyo polen es diseminado por múltiples animales; por ejemplo, en una comunidad semidesértica costera de Canarias, *Aeonium holochrysum* (Crassulaceae) es visitada por un 80 por ciento de los polinizadores presentes.

DISPERSORES DE SEMILLAS

Como sucede con los polinizadores, las islas poseen un conjunto depauperado de dispersores. La gran mayoría de ellos son vertebrados, básicamente aves (sobre todo paseriformes, pero también otras de mayor tamaño, como gaviotas o cuervos) y reptiles (lagartos, iguanas y tortugas). Algunas plantas incluso dependen exclusivamente de los reptiles para la dispersión de sus semillas, como *Daphne rodriguezii*, en la isla de Menorca. Este hecho contrasta con lo que se observa en el continente, donde los principales dispersores son aves y mamíferos. En algunas islas continentales o de origen mixto (continentales pero con volcanismo activo en algún momento de su formación), los mamíferos, especialmente los murciélagos de gran talla (Macroquirópteros), ejercen también una notable función dispersora, tal como se ha visto en la región del Caribe o en Indonesia.

Un factor que facilita la adaptación de los vertebrados que colonizan las islas es la gran posibilidad que tienen de ampliar su nicho trófico cuando llegan al nuevo medio. Así, animales que en el continente eran olífagos (con un escaso repertorio trófico) se vuelven polífagos en las islas, ya que aquí suelen hallar recursos tróficos alternativos escasamente explotados. Otro gran cambio evolutivo que experimentan algunos animales es el aumento de talla, lo que les facilita el acceso a ciertas fuentes de alimento. Este fenómeno es característico de especies vegetarianas (como lagartos o iguanas), las cuales dispersan una gran cantidad de semillas.

No todos los animales poseen la misma eficacia a la hora de diseminar las semillas. El éxito suele depender de la frecuencia con la que consumen los frutos, de la viabilidad de las semillas después de atravesar su tracto digestivo y de la probabilidad de que las depositen en sitios apropiados para su germinación y establecimiento.

Los animales poseen distintos rasgos que influyen en el éxito de la dispersión. Destacan las características ecomorfológicas, como la presencia o ausencia de dientes, la regurgitación o defecación de las semillas, la longitud del tubo digestivo (que determina el tiempo de retención de las simientes); o las fisiológicas, como la composición química de sus jugos gástricos; y, por último, de comportamiento, como el uso del hábitat, que condiciona en gran medida la distribución espacial de las semillas. En los sistemas insulares, son bastante comunes las plantas en las que interviene más de un grupo de dispersores, como aves y reptiles, y nuestros estudios han demostrado diferencias destacables en la efectividad de cada gremio de dispersores.

ESCASEZ DE ANIMALES MUTUALISTAS

Una vez llegada a una isla, una especie ha de ser capaz de establecerse, a veces a partir de uno o pocos individuos. Dado que llega sin la compañía de sus mutualistas continentales, aquellos organismos que puedan reproducirse de forma independiente (por autofecundación o clonación) tienen más probabilidad de asentarse que los que no poseen tal capacidad. Este fenómeno se conoce como ley de Baker y se ha confirmado en numerosas especies. En los archipiélagos de Juan Fernández y Galápagos, por ejemplo, más del 85 por ciento de las angiospermas analizadas son autocompatibles (pueden reproducirse mediante autofecundación). Además, al comparar taxones que cohabitan en islas y continentes, se ha constatado también la pérdida de adaptaciones florales promotoras de una reproducción cruzada y la adquisición de atributos que las hacen menos dependientes (o totalmente independientes) de animales para su polinización y dispersión.

A pesar de que en las floras insulares abundan los taxones autógamos (que presentan autofecundación), también resultan frecuentes los mecanismos que promueven la transferencia de polen entre individuos. Ejemplo de ello son la dicogamia y la hercogamia (separación temporal y física, respectivamente, de la función masculina y femenina). La evolución de tales estrategias probablemente se explica porque la selección natural intenta evitar la homocigosidad (presencia del mismo alelo en los dos locus de un gen); de este modo, se favorece también la diversificación de los taxones. Otros mecanismos que contribuyen al cruzamiento entre individuos son la anemofilia (polinización mediada por el viento), la dioecia (separación de sexos en distintos individuos de la misma especie) y sus variantes. De hecho, existe una creciente evidencia sobre la incidencia de ambofilia (polinización mediada por viento y por insectos simultáneamente); entre las plantas ambófilas estudiadas por nuestro equipo se incluyen *Buxus balearica* (Buxaceae), *Thymelaea velutina* (Thymelaeaceae), *Rhamnus ludovici-salvatoris* y *R. alaternus* (Rhamnaceae).

Cabría esperar también que las plantas insulares generalistas fueran más exitosas que las muy especializadas, aunque todavía disponemos de escasos datos para corroborar esta hipótesis. El estudio de las características de las floras insulares nos lleva, de hecho, a plantear interesantes preguntas sobre si son el resultado del filtro de la selección natural a la que han estado sometidas durante su establecimiento o si, por el contrario, dichos caracteres han evolucionado de forma autónoma una vez establecidas las plantas bajo las condiciones ecológicas particulares de cada isla. Así, nos preguntamos: ¿se han instaurado básicamente los vegetales que ya eran generalistas en el continente, o bien se han vuelto generalistas, una vez instaurados, como respuesta a la pobre fauna de polinizadores?

INTERACCIONES PECULIARES

En las islas, las plantas establecen a menudo interacciones con vertebrados oportunistas que necesitan complementar su dieta debido a la relativa escasez de recursos en este entorno. Como consecuencia de la baja competencia interespecífica y de los reducidos niveles de depredación y parasitismo, estos animales tienden a ser muy abundantes, lo que a su vez da lugar a una elevada competencia intraespecífica y a una ampliación del nicho ecológico.

Algunas interacciones entre plantas y vertebrados solo han podido evolucionar en un ambiente libre de depredadores. Un caso ilustrativo lo hallamos en Nueva Zelanda, donde el murciélago no volador *Mystacina robusta,* al carecer de depredadores nativos (aunque en la actualidad está amenazado por ratas introducidas), actúa como polinizador de una planta endémica, *Dactylanthus taylorii* (Balanophoraceae).

En las islas también resultan habituales los animales que actúan como dispersores de semillas de plantas que ellos mismos han polinizado. Este fenómeno se conoce como mutualismo doble y se ha descrito en Nueva Zelanda, Mauricio, Nueva Caledonia, Canarias, Baleares y Galápagos. Los mutualistas dobles suelen ser aves, reptiles, murciélagos e incluso hormigas, y tienden a habitar ambientes con baja diversidad animal. Dado que la intervención de un mismo mutualista en dos procesos distintos





LA DIPLOZOOCORIA es un proceso complejo que consiste en la dispersión de una semilla en dos pasos, con la intervención de dos especies animales. En Canarias hemos estudiado este fenómeno en aves depredadoras que presentan distinta capacidad dispersiva, como el alcaudón meridional (*Lanius meridionalis*, *a*) y el cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*, *b*). Uno y otro se alimentan de lagartos endémicos del género *Gallotia* que antes han consumido semillas.

GUSTAVO PEÑA Y BENEHARO HERNÁNDEZ

podría perjudicar la supervivencia tanto de la planta como del animal, se postula que ello podría implicar una desestabilización para la comunidad. No obstante, se necesitan más estudios para corroborar dicha hipótesis.

Otro de los fenómenos que podemos hallar en las islas es la diplozoocoria, o dispersión de las semillas a través de dos agentes o más, entre ellos varias especies de vertebrados. Aunque se ha descrito en Galápagos y en Canarias, ha sido en este segundo archipiélago donde nuestro equipo lo ha investigado con mayor profundidad. Los lagartos del género *Gallotia* de estas islas son depredados por dos especies de aves, el alcaudón meridional y el cernícalo vulgar. Los lagartos ingieren una gran cantidad de frutos y semillas, y estas últimas permanecen en su tracto digestivo durante varios días e incluso semanas. De este modo, las aves depredadoras de los lagartos suelen realizar una dispersión secundaria de las semillas previamente ingeridas por ellos.

Hoy sabemos que más de 70 especies vegetales (entre ellas endémicas, nativas e introducidas) en el archipiélago canario son dispersadas por medio de este complejo mecanismo. No obstante, la diplozoocoria puede tener consecuencias distintas para una planta en función del depredador que intervenga. En el caso de que se halle implicado un alcaudón (que normalmente ingiere las presas enteras), las semillas se ven sometidas a un doble procesamiento en los tubos digestivos. Sin embargo, cuando el depredador es un cernícalo (que suele desechar tanto la cabeza como gran parte del tubo digestivo), la mayoría de las semillas sufre un único proceso digestivo. Además, ambas aves difieren en el uso del hábitat y la capacidad de desplazamiento en vuelo, lo que conlleva grandes diferencias ecológicas en los eventos dispersivos. Para aquellas plantas cuyos frutos son consumidos únicamente por lagartos, la dispersión secundaria ejercida por las aves depredadoras de estos es la única vía de desplazarse a larga distancia, ya que estos reptiles tienden a ocupar territorios bastante reducidos (inferiores a 50 metros de radio en muchos casos). La diplozoocoria, de hecho, podría suponer un mecanismo para la colonización de islas por parte de algunas especies de plantas, y posiblemente resulte bastante frecuente en ellas.

MUTUALISMOS AMENAZADOS

Dadas sus características intrínsecas, los ecosistemas insulares muestran una notable fragilidad ante las perturbaciones. De hecho, una gran parte de la biodiversidad amenazada se halla en las islas, debido a la degradación del hábitat, la explotación de los recursos naturales, la introducción intencionada o accidental de especies alóctonas (exóticas) o el cambio climático. La extinción de una especie viene acompañada por la desaparición de sus interacciones. Aunque las alteraciones en la polinización y en la dispersión de semillas se describen cada vez con mayor frecuencia, no se conocen en profundidad las implicaciones de esos cambios para el mantenimiento de la biodiversidad, ni en los continentes ni en las islas.

Ejemplos icónicos de extinciones en islas son el dodo de isla Mauricio, unas quince especies de azucareros (aves de la familia Drepanididae), de Hawái, varias especies de pinzones de Galápagos o numerosos paseriformes en islas de todo el planeta. Algunas de estas especies desempeñaban un importante papel en sus respectivos ecosistemas, bien como polinizadores o como dispersores de semillas. Al desaparecer se han producido

Profundizar en el mutualismo insular mediante la teoría de redes

En las islas, la interacciones mutualistas relativas a la polinización y la dispersión de semillas presentan un elevado grado de generalización. Ello significa que los vínculos que se establecen entre plantas y animales suelen ser numerosos y tienden a implicar a varias especies, no solo a dos. A pesar de que este fenómeno se había descrito en la bibliografía desde hacía tiempo, solo hace algo más de una década se han podido caracterizar y analizar los patrones resultantes del mutualismo a escala de comunidad gracias a las nuevas herramientas aportadas por la teoría de redes complejas.

La teoría en cuestión comprende una serie de técnicas para el análisis de las propiedades topológicas y dinámicas de un conjunto de elementos que interaccionan entre sí. Según el paradigma de los sistemas complejos, la interacción da lugar a fenómenos emergentes que no podrían explicarse mediante el análisis de sus componentes por separado. Una aproximación de redes permite identificar las propiedades generales de las asociaciones de especies y conocer sus consecuencias ecológicas y evolutivas, además de evaluar el papel de cada organismo en la comunidad.

Las comunidades insulares tienden a exhibir un elevado nivel de conectancia (proporción de interacciones entre nodos, o especies, que ocurren respecto a todos los hipotéticamente posibles), la cual puede alcanzar hasta el 30 por ciento. No obstante, dentro de una isla puede registrarse una enorme variabilidad en función del hábitat estudiado. De este modo, la laurisilva canaria muestra una conectancia de solo un 9 por ciento debido a la alta especificidad de las interacciones de polinización. Por otro lado, la mayoría de las redes mutualistas insulares presenta una dominancia de interacciones asimétricas: las especies especialistas de uno de los conjuntos (animales o plantas) tienden a interactuar sobre todo con las generalistas del otro conjunto.

Del alto grado de generalización y asimetría emerge un patrón «encajado», de tal forma que las interacciones de las especies especialistas involucran especies que interactúan también con las generalistas. Esta característica proporciona parejas de interacción estables a los organismos especialistas. Sin embargo, implica también que la pérdida de una especie generalista podría resultar en un colapso de la red, con la extinción secundaria de especies en cadena. Ello afectaría seriamente a la diversidad de la comunidad y a su funcionalidad, al reducir, por ejemplo, el éxito reproductivo de numerosas plantas.

Por otro lado, la simplicidad de las redes de dispersión insulares las hace más fácilmente restaurables que las continentales. No obstante, debido a la elevada proporción de endemismos en las islas, la pérdida de especies clave en ellas tiene seguramente efectos más graves que en el continente. Por consiguiente, en el ámbito de la restauración ecológica existe una presión creciente para que las especies introducidas se consideren como posibles reemplazantes de las nativas desaparecidas. En este sentido, conocer en detalle las redes de dispersión puede ser muy útil a la hora de elaborar planes de manejo y monitoreo de la efectividad de la restauración. Las redes proporcionan una herramienta valiosa para evaluar, más allá de la composición de especies, la funcionalidad del ecosistema y permiten identificar las especies clave en el mutualismo, las cuales deberían ser el foco de los esfuerzos de conservación y gestión. Además, sirven para predecir las consecuencias de la introducción de especies nuevas o de los programas de erradicación de las invasoras.



Redes mutualistas
En la imagen se representa la matriz de interacción entre distintas especies de frutos carnosos (*abcisas*) de un bosque de Tenerife y cinco especies de aves que dispersan sus semillas (*ordenadas*). Cada rectángulo negro indica la magnitud de la interacción: su tamaño es proporcional al número de visitas de cada especie de ave a la planta. Puede observarse el patrón encajado o anidado de la red, en el que las especies con pocas interacciones, o enlaces (especialistas), establecen conexiones con las que presentan muchos enlaces (generalistas), mientras que estas últimas interaccionan también entre sí.

FUENTE: «ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE DISPERSIÓN DE SEMILLAS EN UN ECOSISTEMA MEDITERRÁNEO EN CONDICIONES DE INSULARIDAD: EL BOSQUE TERMÓFILO DE CANARIAS», TESIS DOCTORAL DE AARÓN GONZÁLEZ CASTRO, UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, 2013; BENEHARO RODRÍGUEZ (aves)



XAVI ROTLLÁN

INTERACCIONES EN PELIGRO: Algunos mutualismos entre plantas y animales pueden llegar a extinguirse y comprometer el futuro de las plantas en las islas. Así sucede cuando su reproducción está fuertemente vinculada a un dispersor que se halla en declive. Es el caso de estas semillas de *Cneorum tricoccon*, dispersadas por los lagartos endémicos de Baleares (*Podarcis*).

efectos en cascada, como los documentados con la extinción de ciertas aves en Nueva Zelanda sobre la densidad de algunas especies vegetales. En Hawái, la extinción de los azucareros ha trastocado los procesos de polinización en los que intervenían estas aves.

La desaparición de palomas y tórtolas (Columbiformes) en las islas Rodrigues, Mauricio, Reunión, Ogasawara o Marquesas ha conllevado la extinción o disminución de numerosas plantas endémicas con frutos y semillas voluminosas. Debido a la limitación en la anchura mandibular de los dispersores, los frutos de tamaño reducido son consumidos por una mayor diversidad de animales que los grandes. Así, en muchas islas, la ausencia de los dispersores de gran talla (dodó, moas, cuervos, lagartos grandes) ha colapsado la propagación de ciertas plantas o ha promovido la evolución de frutos (y semillas) de menores dimensiones para ampliar el conjunto de los dispersores.

De entre todos los motores de cambio que está experimentando nuestro planeta, las invasiones biológicas son las que tienen una mayor repercusión sobre la biodiversidad insular. Los casos más flagrantes los hallamos en Hawái, Mauricio, Galápagos, Azores, Nueva Zelanda o la Polinesia Francesa, por citar algunos ejemplos. La globalización de la economía mundial ha promovido el movimiento no solo de personas, sino también de «mercancías», entre las que se incluye una gran cohorte de especies exóticas, muchas de las cuales logran asentarse en los territorios insulares. Las nuevas especies pueden causar un impacto negativo en las nativas: tienden a perturbar la estructura y el funcionamiento de sus redes mutualistas y, a su vez, a disminuir el éxito biológico (*fitness*) de distintas especies animales y vegetales autóctonas. Así lo hemos comprobando al estudiar el efecto de dos plantas invasoras, la uña de gato (*Carpobrotus*) y las chumberas (*Opuntia*) en comunidades costeras de Baleares y Canarias, respectivamente. Ambas especies acaparan la atención de los polinizadores, los cuales visitan menos a otras flores nativas, como el cuernecillo de mar (*Lotus cytisoides*) en las Baleares y *Schizogyne sericea* en las Canarias.

En cuanto a las invasiones de animales, aparte de los efectos negativos de la abeja de la miel o los abejorros sobre las abejas nativas, como ya hemos indicado, cabe mencionar las consecuencias de la introducción de herbívoros de distintas tallas en muchas islas del mundo. Es el caso de pequeños múridos (ratones y ratas), conejos o grandes artiodáctilos (cabras, ovejas, cerdos). Estos animales pueden alterar la capacidad reproductora de las plantas, bien de modo directo, debido a que consumen sus flores, o de modo indirecto, porque compiten con sus polinizadores y dispersores (sobre todo, vertebrados) y modifican su comportamiento. Los grandes herbívoros, en particular, como las cabras, las ovejas y los muflones, suelen producir daños cuantiosos en todo el ecosistema debido a que poseen altos requerimientos energéticos, lo que se traduce en la ingestión diaria de varios kilos de alimento por individuo y provoca un claro proceso de transformación y fragmentación del hábitat.

La introducción y posterior invasión de mamíferos carnívoros, como ginetas, martas, gatos asilvestrados o comadrejas, en numerosas islas, especialmente en el Mediterráneo, ha perturbado también la dispersión de semillas. Nuestro equipo ha dedicado notables esfuerzos a estudiar tal fenómeno en Baleares y Canarias. En ambos archipiélagos, la introducción de carnívoros ha promovido la extinción de dispersores nativos (en concreto, de lagartos), lo que ha provocado una regresión de varias plantas endémicas que dependían de ellos para su dispersión.

En algunos casos, los carnívoros ejercen como nuevos dispersores de las plantas (algunos mustélidos son altamente frugívoros) y reemplazan en parte a los nativos; sin embargo, en otros casos, las semillas pierden viabilidad al ser ingeridas por los nuevos animales.

En ciertas ocasiones, los animales invasores facilitan a su vez la dispersión de plantas que también lo son, con lo que se acelera de forma recíproca el proceso de invasión, un fenómeno denominado colapso por invasión (*invasional meltdown*). Existen numerosos ejemplos que ilustran este efecto. Uno de ellos son las chumberas, plantas originarias de Centroamérica que suelen ser diseminadas por diversos vertebrados (mayoritariamente mamíferos, incluidos los conejos) en varios ecosistemas de Europa y África, tanto insulares como continentales.

MEDIDAS DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Uno de los campos emergentes, aunque polémicos, en biología de la conservación es el de la repoblación de un entorno con especies sustitutivas análogas a las extinguidas, una práctica conocida como renaturalización (*rewilding*). Algunos autores, como nuestro colega Dennis Hansen, de la Universidad de Zúrich, han propuesto hace poco que la repoblación de las islas resultaría más factible que la del continente, básicamente por dos razones: por un lado, las extinciones antropogénicas han sucedido en las islas en tiempo reciente, sobre todo en los últimos siglos, de modo que todavía no han conllevado transformaciones muy profundas en el medio; por otro, algunas de las especies insulares son de menor tamaño que las continentales, por lo que requieren un espacio más reducido para implementar los proyectos de repoblación. De hecho, debido a sus ecosistemas relativamente simples, las islas ofrecen oportunidades ideales para plantear preguntas que resultarían difíciles de responder en los ecosistemas más complejos de los continentes.

A pesar de que las extinciones en las islas son recientes, existe un gran desconocimiento sobre el papel ecológico y evolutivo que desempeñaban muchas de las especies desaparecidas. Con todo, cabe imaginar que algunas cumplían funciones importantes, como los herbívoros polinizadores o frugívoros. La filosofía que hay detrás de los proyectos de renaturalización es la de recuperar la funcionalidad del conjunto del ecosistema, más que preservar especies o interacciones concretas. Los organismos empleados como sustitutos corresponden a taxones emparentados con los extintos y se consideran esenciales para mantener la función de estos últimos.

Los proyectos actuales de repoblaciones insulares se centran mayoritariamente en las aves, aunque hace poco también se han introducido tortugas gigantes terrestres. Nueva Zelanda y las islas Mascareñas son archipiélagos pioneros que han implementado proyectos de renaturalización. En Madagascar, tal estrategia puede ser la única manera de recuperar algunas de las interacciones perdidas de los extintos pájaros elefante, lémures gigantes o tortugas gigantes. Numerosas islas del Pacífico, como Hawái o Galápagos, son candidatas ideales para aplicar este tipo de restauración y, de hecho, ya se han iniciado diversos proyectos en algunas de ellas.

La renaturalización no solo hace referencia a los animales, sino también a algunas plantas. Es conocido el caso de la palma endémica de la isla de Pascua, *Paschalococos disperta* (Arecaceae), una especie clave en el ecosistema de esa isla y que se extinguió presumiblemente debido a su sobreexplotación por los humanos. Hoy en día, existen proyectos para repoblar la isla con una palma casi idéntica que es nativa del continente chileno. Del mismo modo, en Hawái se están introduciendo varias especies vegetales que supuestamente cumplen igual función —o similar— que la desempeñada por otras ya desaparecidas.

En determinadas situaciones, se da la paradoja de tener que preservar y mantener especies invasoras para regenerar los hábitats nativos de las islas. Es el caso de *Zosterops japonica*, un pájaro introducido en Hawái que actualmente es el principal polinizador de una serie de plantas polinizadas antes por drepánidos, unas aves allí extintas. La especie exótica ejerce además como dispersora de las plantas autóctonas, por lo que resulta necesaria para regenerar los bosques de estas islas.

A la hora de plantear un proyecto de restauración en una isla es imprescindible tener en cuenta también la idiosincrasia cultural, política, económica y natural del lugar. Antes de llevarlo adelante, deben valorarse los pros y los contras de la repoblación y deben marcarse unos objetivos a corto y largo plazo bien claros y evaluables.

Las islas constituyen ambientes donde conviven una serie de plantas y animales que presentan grandes especificidades. Muchas de estas especies, y las interacciones entre ellas, son endémicas, habiendo evolucionado en unos ambientes sumamente particulares, que pueden variar mucho entre archipiélagos e incluso entre islas dentro de un archipiélago.

Aunque los estudios realizados en islas icónicas a escala mundial han identificado algunos patrones generales sobre las interacciones entre especies (en particular, las mutualistas), estamos todavía lejos de comprender bien cómo estas relaciones estructuran y contribuyen al funcionamiento de los ecosistemas insulares. Lo que sí resulta evidente es que su alteración, causada por las crecientes amenazas del cambio global, puede llevar al colapso de las comunidades autóctonas, con la consiguiente pérdida de biodiversidad y una homogenización del medio. Profundizar en el estudio de las interacciones mutualistas sin duda contribuirá al mejor conocimiento de las islas y a elaborar con mayor rigor planes de conservación y manejo de sus ecosistemas singulares y diversos.

PARA SABER MÁS

Biological invasions as disruptors of plant reproductive mutualisms. Anna Traveset y David M. Richardson en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 21, págs. 208-216, 2006.

Secondary seed dispersal systems, frugivorous lizards and predarory birds in insular volcanic badlands. Manuel Nogales et al. en *Journal of Ecology*, vol. 95, págs. 1394-1403, 2007.

Mutualismos planta-animal en islas: Influencia en la evolución y mantenimiento de la biodiversidad. Anna Traveset et al. en *Ecología y Evolución de Interacciones Planta-Animal*, dirigido por Rodrigo Medel et al., págs. 157-180. Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 2009.

Conservation and restoration of plant-animal mutualisms on oceanic islands. Ch. N. Kaiser-Bunbury et al. en *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 12, págs. 131-143, 2010.

Seed dispersal interactions in the Mediterranean region: Contrasting patterns between islands and mainland. Aarón González-Castro et al. en *Journal of Biogeography*, vol. 39, págs. 1938-1947, 2012.

Island biogeography of mutualistic interaction networks. Kristian Trøjelsgaard et al. en *Journal of Biogeography*, vol. 40, n.º 11, págs. 2020–2031, 2013.

Bird-flower visitation networks in the Galápagos unveil a widespread interaction release. Anna Traveset et al. en *Nature Communications*, vol. 8, n.º 6376, págs. 1–6, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La selección natural y los pinzones de Darwin. Peter R. Grant en *IyC*, diciembre de 1991.

Lémures de Madagascar. Ian Tattersall en *IyC*, marzo de 1993.

Redes mutualistas de especies. Pedro Jordano y Jordi Bascompte, en *IyC*, septiembre de 2008.

CAMBIO CLIMÁTICO

¿Cómo afecta la subida del

Usar la isla de Kiribati como símbolo de la devastación causada por el ascenso del nivel del mar no solo lleva a error, quizás hasta resulte perjudicial

Simon D. Donner

EN LAS ANGOSTAS Y EXUBERANTES ISLAS del atolón de Tarawa vive y trabaja la mitad de la población de Kiribati.

a las islas mar?



EN SÍNTESIS

Países y agencias de ayuda internacional están construyendo a toda prisa malecones y aplicando otras medidas para intentar salvar a las naciones insulares pobres ante la subida del nivel del mar. Pero hay islas que no están inundándose, incluso puede que estén elevándose como resultado de procesos ecológicos naturales.

Las prisas por hacer un bien, la falta de preparación científica en las islas y la escasa reticencia de los nativos ante las ideas de los extranjeros han dado lugar a unos proyectos de adaptación deficientes.

Se necesita un mayor conocimiento científico y cultural para concebir la solución que más convenga a las naciones insulares ante la amenaza del cambio climático, como formas de reubicar con dignidad a las personas.



Simon D. Donner, profesor de climatología en la Universidad de la Columbia Británica, se interesa por el efecto del cambio climático en los ecosistemas y la sociedad. Lleva diez años estudiando tal efecto en los arrecifes de coral, así como las dificultades de la adaptación a él en las islas del Pacífico.

Solo tres días antes de terminar una larga prospección científica, asistí por fin al fenómeno que me había empujado a viajar a través de medio mundo. Constaté la subida del nivel del mar.

Soplaba un temporal del noroeste en la laguna casi siempre en calma del atolón de Tarawa, la capital de Kiribati. Esta nación insular del Pacífico es hoy símbolo de los lugares con mayor probabilidad de acabar sumergidos a causa del cambio climático y el ascenso del nivel del mar. Aquella tarde, con la marea alta, las olas rompían malecones, inundaban carreteras y anegaban casas a lo largo de las muy pobladas islas de Tarawa Sur.

Como los demás extranjeros que llegamos al aeropuerto internacional de Bonriki, con los dientes aún apretados tras aterrizar en una pista que se extiende de costa a costa, esperaba observar fácilmente los efectos del cambio climático en un remoto país en vías de desarrollo que carece del dinero y de los conocimientos necesarios para adaptarse. La mar tan alta parecía confirmar mi hipótesis. Ese mes del año 2005, el mareómetro señaló por primera vez una altura de más de tres metros con respecto al valor de referencia. El futuro había llegado.

Este año se cumple el décimo aniversario de la primera de mis visitas a Kiribati, que después han acabado por sucederse con regularidad. En ellas investigo de qué forma se están adaptando las islas y sus habitantes a los cambios de la atmósfera y del océano. A lo largo de este último decenio, el país, que ni aparecía en las bases de datos de mi agencia de viajes, ha adquirido fama internacional. Sin embargo, el mareómetro no ha vuelto a marcar los tres metros de altura.

No nos equivoquemos. Kiribati y otros países insulares, como Tuvalu, las islas Marshall y las Maldivas, corren peligro por el aumento del nivel del mar. El sentimiento mundial de que «hay que salvar Kiribati» y el dinero invertido para ese fin han crecido muchísimo. Pero tras presenciar la realidad sobre el terreno, he comprobado que parte de la respuesta internacional está mal concebida y podría hacer más mal que bien.

He trabajado con la gente de Kiribati, he escuchado sus historias y he aprendido sus costumbres; sus antepasados me han bendecido; me las he visto y deseado para mantenerme con las piernas cruzadas sobre una alfombrilla durante las reuniones comunales; he comido todo tipo de alimento marino local; sin disponer de herramientas, he reparado equipos de submarinismo; y me han atendido cuando enfermé con la fiebre del dengue. Estas experiencias y mis análisis de las pautas del clima y del nivel del mar me han enseñado sobre las dificultades del mundo real más de lo que puede aprenderse desde lejos. Y me han llevado a la conclusión de que en la actualidad no hay una necesidad inmediata de amurallar las islas con malecones o evacuar a todos sus habitantes.





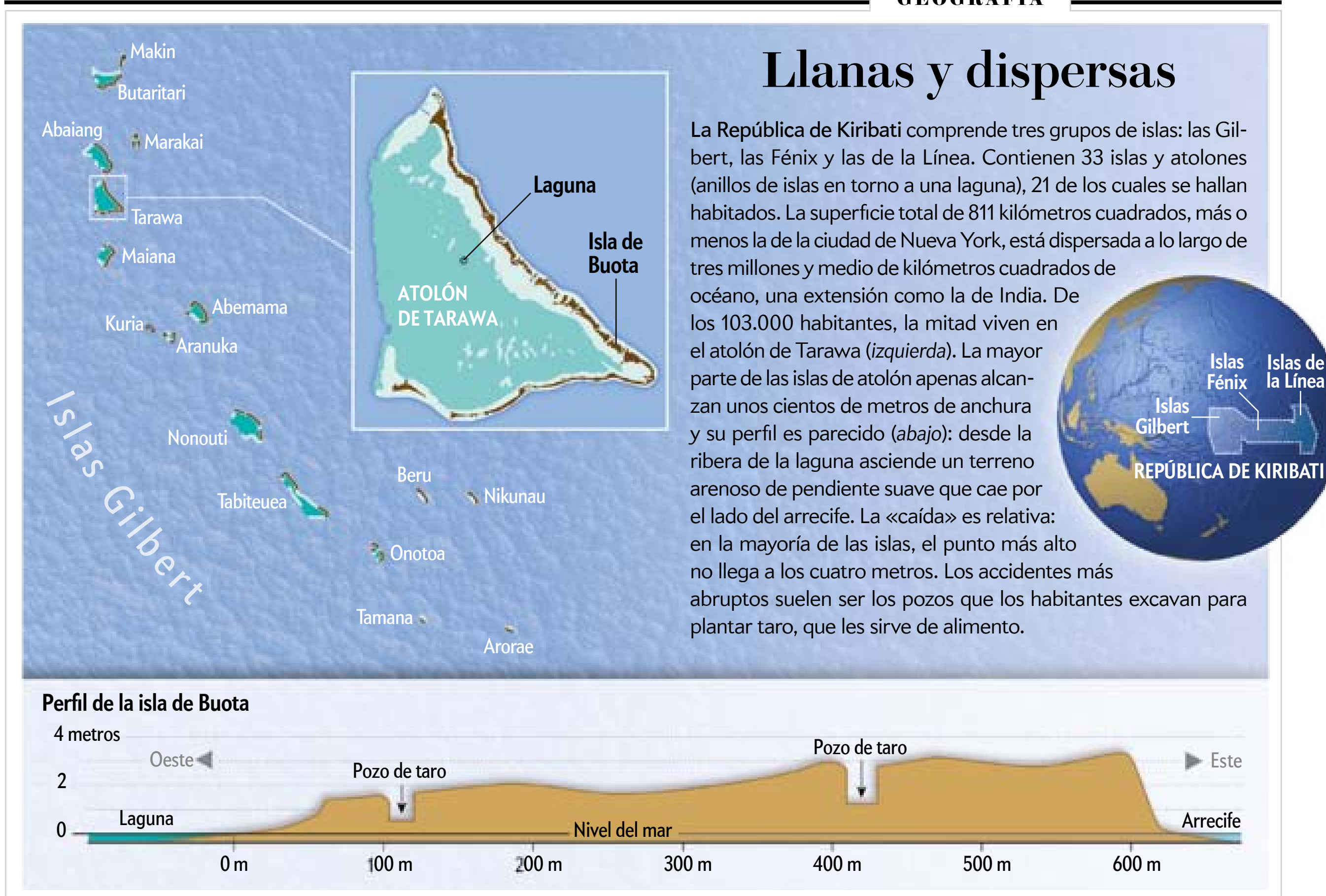
CON INGENIO, los habitantes se adaptan de muchas formas a un océano cambiante. Una mujer y su hijo cuidan de su propio malecón (*arriba*); un hombre disfruta de su palafito (*abajo*).

CLAIRE MARTIN, INSTITUTE (*páginas anteriores*); JUSTIN MCMANUS, GETTY IMAGES (*malecón y palafito*)

Lo que la gente de Kiribati y de otros países de baja altitud necesita, en cambio, son planes de adaptación bien meditados y elaborados a la medida de sus necesidades, y una ayuda internacional coherente, no un frenético correr a efectuar apaños rápidos que harán que el resto del mundo se sienta bien, pero obligan a los isleños a representar el papel de víctima indefensa.

EJEMPLO PARADIGMÁTICO

Kiribati (que allí pronuncian «kiribas») parece representar sin duda el arquetipo mismo de la subida del nivel del mar. No solo se halla en medio del océano Pacífico: es su punto medio, como



FUENTE: «REEF-ISLAND TOPOGRAPHY AND THE VULNERABILITY OF ATOLLS TO SEA-LEVEL RISE» POR COLIN D. WOODROFFE EN *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE*, VOL. 62, N.os 1-2, MAYO DE 2008 (*perfil de Buota*); EMILY COOPER (*mapas*)

también el único país que atraviesa el Ecuador, la línea internacional del cambio de fecha y, para quien, desconcertado, lo visita por primera vez, la línea hacia una extraña tierra de fantasía.

Si se juntasen en una todas las islas de Kiribati, cubrirían solo unos dos tercios del área de la ciudad de Nueva York; pero, dispersas por el océano, ocupan una superficie del tamaño de la India. Dos tercios del terreno de las islas Gilbert, en las que vive la mayoría de los 103.000 habitantes de Kiribati, alcanzan menos de dos metros de altitud sobre el nivel del mar. Buena parte de esa tierra es tan estrecha que desde la ribera de una plácida laguna se oye romper las olas en la orilla del mar que se extiende a las espaldas.

Una tasa de natalidad elevada y la búsqueda de empleo han concentrado la mitad de la población en Tarawa Sur, una cadena de islas abarrotada de casas y edificios gubernamentales, restos de la Segunda Guerra Mundial, desechos de la construcción y basureros, y cañerías y retretes que distan de estar en las mejores condiciones. El ser humano más rápido, Usain Bolt, podría atravesar a la carrera el ancho de Tarawa Sur en menos de veinte segundos, aunque lo más probable es que se cayese a un pozo de taro o en una cochiquera, le atropellasen varias de esas furgonetas japonesas de los años noventa que sirven allí de autobuses, o tropezara con alguien que hace sus necesidades más allá de la línea de la marea alta para que el mar se las lleve.

No extraña que cuando el Banco Mundial «le dio vueltas a un globo terráqueo» para elegir el país más «vulnerable» al que iba a aplicarle un plan piloto de adaptación al cambio climático se quedase con Kiribati. Hoy, la Oficina del Presidente de ese país recibe cinco solicitudes de medios de comunicación a la semana de *i-Matang* (extranjeros) que quieren contar lo que le pasa a un país que lucha contra la subida del nivel del mar, según Rimon Rimon, portavoz del Gobierno.

Kiribati, sin embargo, no se está rindiendo sin más a las aguas. Predecir el futuro de las islas de arrecifes es como cuadrar las cuentas. No hay que mirar solo las retiradas de dinero (la pérdida de terreno por inundación o erosión); hay que mirar también los ingresos. En algunas zonas, el terreno se está expandiendo. Más aún, parte de las inundaciones no puede achacarse a la subida del nivel del mar, al menos no por ahora.

TERRENO MOVEDIZO

Los atolones de coral son islas vivas: pueden crecer. Esas cadenas anulares de angostas islas de arrecife se cuentan entre los accidentes geográficos más recientes del planeta. En la costa de California hay secuoyas gigantes más viejas que la mayor parte de las islas de Kiribati.

Nuestro conocimiento sobre los atolones se remonta a una notable intuición de Charles Darwin. Mientras viajaba en el Beagle, dedujo que se habían formado por el crecimiento de arrecifes de coral, ávidos de sol, en las laderas de volcanes sumergidos. La prueba irrefutable de su teoría aparecería más de un siglo después, con la bomba de hidrógeno. Unos científicos estadounidenses que perforaban en el atolón Eniwetok, de las islas Marshall, en los días de los ensayos nucleares de los años cincuenta descubrieron un fundamento volcánico miles de metros por debajo del esqueleto calizo del arrecife.

Los esqueletos de arrecife que subyacen a los atolones actuales se construyeron hace mucho. Cuando el nivel del mar

era bajo, en la última era glacial, dieron lugar a islas rocosas de decenas de metros de alto. Al derretirse el hielo, el nivel del mar subió y las islas se inundaron. Nuevos corales fueron siguiendo el ascenso del mar al crecer sobre la roca del arrecife que tenían debajo. Algunos segmentos de los nuevos arrecifes llegaron a irrumpir en la superficie, lo que mató a algunos corales. Aunque estas partes emergentes estaban biológicamente muertas, no lo estaban desde un punto de vista geológico: atrapaban arena y demás materiales erosionados de los arrecifes submarinos circundantes. Las playas se expandieron. Los vientos llevaron semillas. Crecieron plantas. Y con el tiempo, nacieron los atolones, formados por la acumulación de grava y sedimento sobre un arrecife de coral muerto hacía mucho.

Hasta hace poco, se daba por supuesto que la acreción de terreno había tenido lugar cuando finalizó el deshielo tras la última era glacial y el nivel del mar empezó un lento descenso. En los últimos veinte años, sin embargo, geólogos como Paul S. Kench, de la Universidad de Auckland, han hallado indicios de que algunos atolones emergieron al mismo tiempo que se elevaba el nivel del mar. Conrad Neumann, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, y Ian MacIntyre, de la Institución Smithsoniana, señalan que los arrecifes coralinos no siempre «se rinden» ante la subida del nivel del mar, sino que pueden «seguirle el paso» o «darle alcance». Todo depende de la velocidad con que el mar asciende en comparación con el ritmo en que las islas acumulan material.

Precisamente por esa razón el futuro de Kiribati resulta difícil de predecir. Debido a las diferencias en las corrientes oceánicas, la extensión de los arrecifes circundantes, los ángulos de las diversas líneas de costa y la construcción incluso de un simple pantalán, una isla de un atolón puede estar erosionándose mientras otra vecina, o incluso la costa opuesta de la misma isla, crece. Los procesos varían de año en año con las subidas y descensos habituales del océano. Algunas islas de Kiribati menguan, pero otras quizás estén extendiéndose.

El potencial de crecimiento de las islas no es la única circunstancia que hace pensar que esta región no se halla amenazada en estos momentos. Pese a lo que pueda parecer por las infor-

GEOLOGÍA

Auge y declive de los atolones

Las islas de atolón crecen y se desmoronan con el tiempo; en solo unos siglos pueden cambiar mucho. Cuando el nivel del mar sube, algunas evolucionan de modo sorprendente. Las corrientes oceánicas locales, al aportar y llevarse sedimentos, pueden construir una isla mientras erosionan otra en su vecindad. Levantar una estructura simple, como un muelle, puede alterar el equilibrio de modo involuntario.

Formación: Hace muchos años (*izquierda*), los corales, ávidos de sol, empezaron a construir arrecifes sobre un volcán en medio del océano. El volcán acabó por erosionarse (*centro*) y la fusión de los glaciares hizo que ascendiese el nivel del mar. Los corales crecieron hacia arriba, siguieron al agua pese a que subiese su nivel y formaron un anillo alrededor de una laguna. Cuando el nivel de agua se estabilizó (*derecha*), algunos corales emergieron. Expuestos, murieron, pero atraparon arena y material de los corales vivos circundantes, y así se formaron islas de poca altitud, en las que crecería la vegetación.

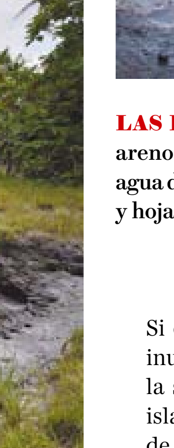
Evolución: Las tormentas y las olas aportan arena y grava, y construyen así una cresta en el lado de la isla que da al océano (*izquierda*). Los habitantes viven a lo largo de la franja media, protegidos por la cresta y cerca de las aguas subterráneas. El terreno del lado de la laguna permanece siempre más llano. Cuando sube el nivel del mar (*derecha*), puede que las olas erosionen la cresta, inunden la laguna, salen las aguas subterráneas y destruyan la vegetación. Si el ascenso es gradual, la acumulación de arena y grava permite ganar terreno lo bastante deprisa para que el agua no lo sobrepase; si es rápida, la inundación puede dividirlo y sumergirlo.

EMILY COOPER









LAS FILTRACIONES DE AGUA MARINA en el suelo arenoso pueden matar los cocoteros (*1*), salar los pozos de agua dulce (*2*) y dañar el taro, o malanga, una planta de raíces y hojas comestibles que se cultiva en pozos (*3*).

JUSTIN McMANUS, GETTY IMAGES (1 Y 3); DAVID GRAY, CORBIS (2)

maciones de los medios de comunicación, la subida del nivel del mar no ha creado una alerta permanente de inundaciones en Kiribati, Tuvalu o cualquier otro país de atolones. El cambio climático aumenta la probabilidad de los sucesos extremos, como las inundaciones, pero la altura local del océano en un instante dado sigue dependiendo de las variaciones naturales de las mareas, del tiempo meteorológico y de la dinámica del océano a gran escala.

En ninguna parte resulta más evidente esta variabilidad que en Kiribati. Es el único país que se sitúa en plena trayectoria de El Niño, la malévola interacción entre el océano Pacífico y la atmósfera que perturba el clima cada pocos años. La alteración de los vientos y corrientes ecuatoriales que caracteriza a El Niño hace que en Kiribati el océano ascienda. La diferencia del valor medio del nivel del mar en Tarawa entre la subida correspondiente a El Niño de 1997 y la bajada al año siguiente con La Niña, el fenómeno de carácter opuesto, fue de 45 centímetros. Lo cual equivale a una colina para una tierra tan llana como Kiribati.

La inundación récord que observé en 2005 coincidió con una tormenta típica de El Niño, un sistema temporal de bajas presiones que impulsaba agua hacia Tarawa, y la marea más alta del año. El nivel del mar fue cómplice del crimen, pero solo uno más de un largo reparto. Entre El Niño, el tiempo meteorológico y las mareas, resulta difícil identificar la contribución de la subida del nivel del mar a las inundaciones y erosiones actuales en Kiribati.

Sin duda, el ascenso del nivel del mar se verá como el principal responsable de los futuros eventos tras las inundaciones de 2005. Por desgracia, con este celo mundial por encontrar ejemplos de pueblos y lugares afectados por el cambio climático, la distinción entre lo que *parece* y lo que *es* una elevación del nivel del mar se vuelve borrosa.

ESTEREOTIPO FALSO

Si el mundo tiene la sensación de que Kiribati se está inundando es porque no se ha explicado de forma debida la situación real. Casi todo lo que se cuenta sobre las islas se ilustra con una fotografía o un vídeo de la aldea de Bikenikoura, una franja marginal de arena y manglar costero que se inunda en parte cuando la marea es muy alta. El Gobierno de Kiribati, que recibe un diluvio de peticiones para «ver» el ascenso del nivel del mar, dirige allí a los periodistas y dignatarios extranjeros, como el secretario general de las Naciones Unidas Ban Ki-moon. «Viene a ser nuestro caso piloto», dice Rimon. Los visitantes contemplan cómo la marea va introduciéndose en la *maneaba*, la choza de las reuniones comunales, y vuelven a casa contando que el mar se está tragando un país.

Pero Bikenikoura no es el prototipo de lo que ocurre en la región. Cuando la Fraternidad Mundial de las Asambleas de Dios (una asociación internacional de iglesias) quiso crear una comunidad para los isleños que se trasladaban a Tarawa Sur en busca de trabajo, tuvo que conformarse con ese pedazo de tierra porque el suelo posee un alto valor en esa bulliciosa región. Como en muchas partes del mundo en desarrollo, la superpoblación y las presiones económicas desplazan a la gente desde asentamientos más seguros en regiones periféricas hasta nuevos hogares más vulnerables cerca de núcleos poblados. La ribera de la laguna de Tarawa Sur está sembrada de malecones rotos y ciénagas inundadas, una herencia que se debe más a los empeños frustrados por ganar tierra que a la subida del mar.

Tebunginako, la otra aldea modelo para los turistas que desean ver la subida del nivel del mar, es un caso parecido de identidad tergiversada. Las inundaciones que padece son la consecuencia desafortunada de la obstrucción de un canal entre la laguna y el mar desde hace generaciones, seguramente a causa de una tormenta, según el análisis de la Comisión de Geociencia Aplicada del Pacífico Sur.

Que achaquemos erróneamente al ascenso del nivel del mar la culpa de las inundaciones de lugares como Bikenikoura y Tebunginako se debe a nuestras expectativas. La cultura popular, desde las viejas y noveladas historias de los raqueros europeos que erraban por las islas del Pacífico, hasta el bar *tiki*, de estilo polinesio, ha perpetuado el tópico de las islas idílicas pobladas por sencillas aldeas de chozas. Limitarse a visitarlas durante

una sola semana, y con el propósito explícito de documentar los efectos de la subida del nivel del mar, genera una serie de reacciones interculturales que no hacen más que reforzar la imagen de su vulnerabilidad.

Cuando un norteamericano o un europeo viaja a Kiribati, se ve transportado a un universo desconocido. Combínese esa ingenuidad con la naturaleza reservada de la gente de Kiribati, su costumbre de complacer a los forasteros, los incontables *i-Matang* preguntando por el cambio climático y la falta de capacidad científica propia para verificar las aseveraciones que se hacen, y una aldea que se inunda por causas naturales se convertirá en una víctima. Añádase la geopolítica, esto es, la legítima necesidad de un país diminuto, sin peso en la escena internacional, de llamar la atención sobre un peligro que amenaza su existencia, y las exageraciones acerca de las consecuencias del ascenso del mar parecerán intencionadas, lo sean o no.

¿ISLAS QUE SE HUNDEN?

La exageración, sea cual sea su motivo, invita sin remedio al contragolpe, lo que resulta perjudicial porque puede impedir que la nación reciba el tipo correcto de ayuda.

La reacción empezó en 2010, cuando un artículo de la revista *Global and Planetary Change*, firmado por Kench y Arthur Webb, geólogo de costas por entonces en la Comisión de Geofísica Aplicada de las Islas del Pacífico, dio a conocer que la superficie de 23 de las 27 islas de atolón de Kiribati, Tuvalu y los Estados Federados de Micronesia, de las que se disponen fotografías aéreas antiguas, ha aumentado o permanecido estable en las últimas décadas. Aunque en la mayoría de las naciones insulares no se cuenta con datos históricos, se han comunicado resultados parecidos en los atolones de la Polinesia francesa.

Esos hallazgos nos indican que por ahora las corrientes predominantes, la urbanización de las costas y otros factores han pesado más que la subida del mar. El artículo de Kench y Webb señala, por ejemplo, que la isla no urbanizada de Buariki, en Tarawa Norte, ha crecido un 2 por ciento desde 1943 gracias a la acumulación natural de material en la orilla de la laguna. La expansión ha sido mucho mayor en las islas urbanizadas, en numerosas ocasiones como resultado no deliberado de la actuación humana. Un ejemplo lo ilustra: la conexión durante años de las islas de Tarawa Sur con carreteras elevadas ha obstruido el flujo de agua y ha redirigido la arena de la laguna hacia islotes muy poblados, como el centro gubernamental de Bairiki, que se ha extendido un 16 por ciento desde 1969.

Esos datos no nos indican si las islas han crecido en altura, si seguirán ensanchándose cuando el ascenso del nivel del agua se acelere o si conservarán la suficiente agua dulce para las personas y las plantas. Claro está, las islas pueden también erosionarse, como le resultará evidente a un visitante que mire desde la costa de la atareada Bairiki al islote de Bikeman, en la laguna: desprovisto de sedimentos por la construcción de la misma carretera elevada que favoreció la extenión de Bairiki, ha pasado de manchón verde en los mapas coloniales británicos a barra de arena dividida, apenas visible con la marea alta.

Por desgracia, el politizado discurso público sobre el cambio climático es menos matizado que lo que apunta la ciencia acerca de las islas de arrecife. Tras la publicación del artículo de Webb y Kench, los titulares de la prensa ridiculizaban las afirmaciones anteriores de que Kiribati y las demás naciones de atolón corrían peligro por el ascenso del nivel del mar. Las repercusiones actuales de este se han convertido desde entonces en un arma arrojadiza política: el presidente Anote Tong y algunos activistas sostienen que el fin se acerca, y los escépticos de dentro y de fuera de Kiribati se preguntan si el presidente, junto con otros políticos o el país en su conjunto, no hablarán del aumento del nivel del mar solo para llamar la atención internacional y obtener beneficios económicos.

AMENAZAS REALES

La buena nueva es que el dinamismo de las islas de arrecife puede estar dándoles más tiempo a lugares como Kiribati. Ello significa que contarían con algunas décadas que podrían aprovechar para adaptarse y evitar así las evacuaciones.

La mala nueva es que, de tanto cargar las tintas sobre el hundimiento de las islas, la adaptación, difícil de por sí, se complica todavía más. En cuanto un sitio se convierte en arquetipo del cambio climático, ha de seguir desempeñando ese papel para el mundo, observa mi compañera Sophie Webber, doctoranda de geografía en la Universidad de la Columbia Británica.

Kiribati se halla en peligro de verdad. Exagerar esa vulnerabilidad, sin embargo, puede socavar el aguante de las islas y de su gente. Las islas Gilbert del Sur, propensas a las sequías, son famosas en Kiribati por su fuerte ética del trabajo y gran espíritu comunitario. Sin embargo, cuando el agua de los pozos de una de sus poblaciones, Beru, se volvió salada hace un par de años, agacharon la cabeza y le echaron la culpa al cambio climático.

A los habitantes no se les pasó por la cabeza que la causa se hallara en las nuevas bombas de agua impulsadas por energía solar y no pensaron en inspeccionarlas. Se las había proporcionado un organismo de ayuda para sustituir a las antiguas de combustible y resistir así mejor las sequías. Un experto de allí descubrió más tarde que, sin la limitación del combustible, funcionaban sin parar y esquilmaban las aguas subterráneas. Aunque se corrigió el problema, el incidente pone de relieve el lado oscuro del deseo bienintencionado de los extranjeros. La retórica de la amenaza global puede hacer que hasta las personas más autosuficientes echen la culpa de sus problemas al mundo y duden de su capacidad de actuar.

Centrarse en la vulnerabilidad lleva a los medios de comunicación internacionales, e incluso al Gobierno de Kiribati, a decantarse por la información espectacular, que genera publicidad pero no produce mejoras concretas sobre el terreno. Un hombre de Kiribati solicitó que se le reconociese como refugiado en Nueva Zelanda porque, según él, el cambio climático amenazaba su casa; en realidad, había sobrepasado la fecha en que caducaba su visado y no quería irse. Se ha estado diciendo una y otra vez que las tierras que hace poco adquirió el Gobierno de Kiribati en Fiji son un lugar para realojar isleños a los que haya que evacuar de inmediato; en realidad, la operación consistió en un polémico uso de fondos públicos a fin de hacerse con una antigua plantación de cocoteros para la producción de alimentos y otros propósitos, lo que fue criticado de acto de propaganda por los oponentes del presidente Tong.

Lo cierto es que los próximos decenios las bajas islas de arrecife encaran unos tiempos pocos atrayentes de adaptaciones y duro trabajo. El éxito no vendrá de alguna compra de tierras o de proyectos de ayuda de corta duración. Vendrá de años de ensayo y error y de inversiones a largo plazo de la comunidad internacional, con soluciones a la medida de lugares concretos.

Uno de esos planes, el Programa de Adaptación de Kiribati, financiado por el Banco Mundial y otras instituciones para demostrar el modo de adaptarse al cambio climático, ha puesto de manifiesto la gran dificultad de la tarea. Se necesitaron ocho largos años de consultas, formación, desarrollo de políticas y



UNA CARRETERA construida hace varias décadas sobre un terraplén macizo para conectar los islotes de Betio y Bairiki obstruyó el flujo de agua y sedimentos: sin pretenderlo, cambió la forma de las islas cercanas.

definición de prioridades para que el proyecto crease por fin algo concreto en 2011: malecones en varios lugares, entre ellos el extremo de una pista de aeropuerto, un municipio importante y partes de dos carreteras elevadas. Los responsables del proyecto y los contratistas internacionales, presionados por los donantes, el Gobierno de Kiribati y el público para que emprendiesen actuaciones visibles, adoptaron un diseño simple que el Gobierno pudiera copiar en el futuro. Pero ese diseño de compromiso prescindió de las costosas medidas de reducción de la energía de las olas y de la erosión que recomiendan los expertos en costas.

En unos meses, las olas y la erosión de las playas adyacentes habían deteriorado los extremos de los malecones; en un caso quedó peligrosamente expuesta al aire la tubería del agua dulce de Tarawa Sur. Se echó la culpa a las empresas constructoras por el diseño, al Banco Mundial y a los donantes internacionales por la inflexibilidad de los procedimientos y expectativas que influyeron en las decisiones, y a los responsables del proyecto y al Gobierno de Kiribati por no haber apreciado mejor los posibles efectos adversos de los malecones.

Todavía es posible que el fracaso se convierta en éxito. Se están rehabilitando ahora los malecones para el proyecto; se les está dando una forma más inclinada y se absorbe con vegetación parte de la energía que reciben de las olas. Los responsables están creando también un nuevo protocolo para futuros proyectos de adaptación. Enfrentarse al cambio climático en lugares como Kiribati requiere un compromiso duradero para desarrollar la capacidad científica y técnica de la población local, así como aprender de los errores.

UN FUTURO DIGNO

Que las islas de arrecife crezcan en algunos casos y que las medidas de adaptación funcionen no salvará a Kiribati para siempre, sobre todo si no se logran reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Los modelos climáticos prevén que, si mantenemos la tendencia actual de las emisiones, hacia finales del siglo el nivel del mar podría ascender a un ritmo cinco veces superior al actual. Incluso en el improbable caso de que las islas sigan acumulando material al paso de hoy en términos netos, quizá serán más estrechas, empinadas y presentarán menos agua dulce, por lo que resultaría prohibitivo vivir en ellas.

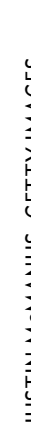
Crecer con el nivel del mar tampoco favorecería las islas urbanizadas, trátese de Tarawa o de Male, la hacinada capital de las Maldivas. En los viejos tiempos, cuando las casas eran de paja y se descomponían más o menos cada siete años, desplazarse al tiempo que cambiaban las islas quizá resultaba factible. Pero hoy, el crecimiento potencial por la acumulación de arena y grava se produce en los costados o en los puntos altos de las islas, donde hay casas, carreteras, hospitales y puertos. La infraestructura podría obstaculizar la evolución natural de las islas, o tal vez esa evolución exija costosas o inviables reubicaciones de la infraestructura. Y carece de sentido esperar que toda la gente se traslade a las islas exteriores, menos pobladas y desarrolladas, como la de Kiritimati, más extensa y seca, situada miles de kilómetros al este de Tarawa. El esfuerzo de reubicar a la población debería contrarrestar una fuerza quizás aún mayor que la del cambio climático: la construcción de infraestructuras.

Kiribati, en cambio, ha emprendido una iniciativa que sirve de ejemplo para las demás naciones insulares preocupadas por su futuro. La llaman «emigración con dignidad»; dependería de países como Australia, con poblaciones que envejecen, y ofrecería a la juventud de Kiribati un lugar donde se necesita su trabajo. De esta forma, si Kiribati llegara al final de sus días, los emigrantes podrían reunirse con una comunidad de expatriados ya existente en vez de que se los tratase como a refugiados.

La iniciativa es un recordatorio de que, para abordar el cambio climático, el pueblo de Kiribati necesita algo más que dinero y asistencia. Necesita respeto. Significa que no se lo utilice como artificio narrativo en el debate sobre el cambio climático o para demostrar que una institución ayuda a la gente a vérselas con él. A pesar de su buena intención, los reportajes redactados a toda prisa y los proyectos de ayuda de corto alcance llevan a malgastar el tiempo y los recursos en ideas fútiles y esfuerzos duplicados, en vez de desarrollar la pericia, estrategias de gestión a largo plazo y relaciones duraderas que contribuyan a prepararse ante un futuro incierto. En 2005 visité Kiribati creyendo que tres semanas me bastarían para saber cómo estaba afectando el cambio climático al país. Diez años después, sigo intentando abordar el problema en toda su magnitud.

Cuando se viaja por mar desde Kiribati, las islas, tan llanas, desaparecen enseguida bajo el horizonte. En los viejos tiempos, los pescadores navegaban de vuelta a casa guiándose por el reflejo en las nubes de las aguas superficiales y verdosas de las lagunas. Puede que un día, en el futuro lejano, muchas de las islas de Kiribati sucumban al mar. Las personas quizá se vayan, los árboles quizá mueran, la tierra quizá se convierta en un arrecife sumergido. Las lagunas, someras todavía en comparación con el profundo océano, seguirán siendo verdes.

Para los forasteros, Kiribati quizá llegue a desaparecer. Para el pueblo de Kiribati, el fantasma de su antiguo hogar seguirá viviendo en las nubes.



PARA SABER MÁS

Nature and stability of atoll island shorelines: Gilbert island chain, Kiribati, equatorial Pacific. Eugene C. Rankey en *Sedimentology*, vol. 58, n.º 7, págs. 1831-1859, diciembre de 2011.

Sea level rise and the ongoing battle of Tarawa. Simon Donner en *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 93, n.º 17, págs. 169-170, abril de 2012.

Storm of the century every two years. Mark Fischetti en *Scientific American*, vol. 308, págs. 58-67, junio de 2013.

Obstacles to climate change adaptation decisions: A case study of sea-level rise and coastal protection measures in Kiribati. Simon D. Donner y Sophie Webber en *Sustainability Science*, vol. 9, n.º 3, págs. 331-45, julio de 2014.

Developments in coral reef and reef island geomorphology. Paul S. Kench en *Geomorphology*, vol. 222, págs. 1-2, octubre de 2014.

Kevin Heng es profesor en el Centro para el Espacio y la Habitabilidad de la Universidad de Berna, donde dirige el grupo de exoplanetas y exoclimas. Coordina la Plataforma de Simulación de Exoclimas (www.exoclime.net), un conjunto de herramientas de código abierto para estudiar la física y la química de las atmósferas exoplanetarias, y participa en el desarrollo del Satélite Caracterizador de Exoplanetas (CHEOPS), un proyecto conjunto de la ESA y la Agencia Espacial Suiza.



EPISTEMOLOGÍA

La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones

¿Proporcionan los ordenadores una tercera forma de establecer la verdad?

Kevin Heng

El empirismo se encuentra en la base del método científico. Su objetivo consiste en entender el mundo a través de la experimentación y la práctica. Hoy, la secuencia de formular y poner a prueba hipótesis falsables se ha fusionado con una forma moderna de racionalismo: el uso del razonamiento, las matemáticas y la lógica para entender la naturaleza. Aunque ambas escuelas de pensamiento están avaladas por siglos de historia, hasta hace poco permanecían claramente diferenciadas.

Uno de los padres del empirismo fue el filósofo escocés del siglo XVIII David Hume, quien creía en una percepción subjetiva del mundo basada en los sentidos. El racionalismo, por su parte, defiende que el uso del razonamiento basta por sí solo para comprender el mundo natural, sin necesidad de recurrir a la experimentación. Sus orígenes se remontan a Aristóteles, Platón y Pitágoras. Algunos de sus proponentes más modernos fueron Kant, Leibniz y Descartes.

Un claro ejemplo sobre el funcionamiento de uno y otro método lo hallamos en astronomía y astrofísica. Los astrónomos descubren y catalogan cuerpos celestes e intentan dar sentido al cielo nocturno a través de las observaciones que llevan a cabo con sus telescopios. Los astrofísicos elaboran teorías, formulan hipótesis y realizan predicciones sobre posibles observaciones; con ello, intentan desentrañar los principios organizativos que unifican los fenómenos astronómicos. Los investigadores practican con frecuencia ambas disciplinas.

A menudo, los problemas en astrofísica —y, por regla general, en física— pueden resolverse atendiendo a sus escalas significativas de longitud, tiempo o velocidad. Al intentar entender el agua en su calidad de fluido, resulta más conveniente contemplarla como un medio continuo que como un enorme conjunto de moléculas; de esta manera, su comportamiento macroscópico se torna mucho más fácil de visualizar y de calcular. La evolución de la Tierra procede en escalas de tiempo geológicas y su clima global apenas cambia de un día para otro, lo que dificulta explicar a la opinión pública la importancia del cambio climático. Los planetas del sistema solar no orbitan alrededor de un Sol estático, ya que el astro oscila con pesadez en torno al centro

EN SÍNTESIS

El método científico se ha basado tradicionalmente en la verificación empírica y la elaboración de teorías. Desde hace unas dos décadas, sin embargo, las simulaciones numéricas se han asentado como una nueva forma de explorar la naturaleza.

Debido a la imposibilidad de hacer experimentos controlados y de tratar analíticamente enormes cantidades de datos, el uso de simulaciones por ordenador resulta hoy clave en ciertas disciplinas, como la astrofísica y la cosmología.

Una simulación numérica puede considerarse un experimento virtual legítimo. Sin embargo, existe el riesgo de emplearlas como «cajas negras», lo que plantea varias cuestiones sobre la reproducibilidad y falsabilidad de sus resultados.



MODELIZAR LA COMPLEJIDAD: Algunos procesos de apariencia simple abarcan todo un abanico de escalas. Este boceto de Leonardo da Vinci sobre un flujo de agua turbulento muestra cómo cada rizo y cada onda se subdividen en elementos cada vez menores. La dificultad para modelizar esta clase de fenómenos reside en captar su comportamiento general sin perder detalle de lo que sucede a las escalas más diminutas. En las simulaciones por ordenador, los supuestos sobre lo que ocurre a ciertas escalas pueden ejercer un profundo efecto sobre lo que sucede a otras.

de masas del sistema; sin embargo, muy a menudo basta con tratarlo como si se encontrase en reposo. Los ciclos de Milankovitch hacen que la excentricidad y la oblicuidad de la órbita terrestre evolucionen a lo largo de cientos de milenios, si bien estas cantidades permanecen prácticamente constantes durante la vida de una persona. Semejante separación de escalas permite desbrozar un problema, llegar hasta sus fundamentos básicos y obtener una perspectiva general de la física más destacable a la escala de interés.

En cambio, los problemas en los que intervienen múltiples escalas no se prestan a esa simplificación. Las pequeñas perturbaciones de un sistema pueden llegar a provocar efectos considerables en un sinnúmero de escalas de tiempo y tamaño. Las estructuras que aparecen a gran escala se «comunican» con las que surgen en escalas menores, y viceversa. Así, uno de los principales retos en astrofísica consiste en desentrañar los procesos de formación planetaria; es decir, predecir la diversidad de exoplanetas que orbitarán alrededor de una estrella a partir de las propiedades de una nube primigenia de gas y polvo. En este caso, las incertidumbres acerca de los detalles microscópicos, como el origen de las turbulencias y los granos de polvo del medio, dificultan predecir el resultado a escalas astronómicas. Numerosos problemas de la vida real (en ámbitos como biología, química, física, meteorología y climatología) exhiben la misma propiedad.

Además de la teoría y la experimentación, la necesidad ha forzado la aparición de un tercer método para establecer la verdad científica: las simulaciones en ordenadores —a menudo gigantescos— que buscan imitar la naturaleza. Su objetivo consiste en recrear un universo sintético en una computadora. Para ello, se establecen las ecuaciones que describen el sistema físico en cuestión, se programan en un ordenador y se deja que el sistema simulado evolucione en el espacio y en el tiempo. Si se plasman con fidelidad todas las leyes físicas relevantes, obtendremos una réplica virtual perfecta, al estilo de *Matrix*, del mundo físico.

Debido a su estatus único dentro de las ciencias experimentales, este tercer método goza de gran éxito en astrofísica y astronomía. A diferencia de las disciplinas que pueden estudiarse en un laboratorio, en astronomía no resulta posible controlar los experimentos: simplemente, no podemos redistribuir a nuestro antojo los cuerpos celestes en el firmamento. Los fenómenos astronómicos suelen codificar información sobre un subconjunto de objetos de cierto tipo en un momento muy específico de su evolución. Por ello, para entender el comportamiento de toda una población de cuerpos celestes a lo largo del tiempo cósmico, necesitamos grandes simulaciones por ordenador. Algunos ejemplos de las clases de objetos a las que nos referimos son los exoplanetas, las estrellas, los agujeros negros, las galaxias e incluso los cúmulos de galaxias. Gracias a las simulaciones, esperamos adquirir una panorámica que permita relacionar fenómenos aparentemente inconexos.

EL NACIMIENTO DE UNA DISCIPLINA

Entre los años cuarenta y ochenta del siglo pasado, el ya fallecido Martin Schwarzschild, prominente astrofísico de Princeton, destacó por abrir camino en el uso de simulaciones para estudiar la evolución de las estrellas y las galaxias. Schwarzschild reparó en la dificultad para obtener soluciones analíticas (calculables con lápiz y papel) de los procesos que rigen la estructura estelar, ya que ello requería entender con detalle la física de la combustión nuclear. Del mismo modo, las galaxias distan mucho de ser esferas perfectas. Schwarzschild comenzó a estudiar las estrellas y las galaxias mediante soluciones numéricas generadas con los grandes ordenadores de su época. Con el tiempo, ese método de indagación evolucionó hasta erigirse en una línea de investigación respetada y bien asentada en astrofísica. Hoy existe la misma probabilidad de encontrar a un astrofísico dándole vueltas a un código informático que escribiendo complejas ecuaciones en una pizarra.

Desde los años noventa hasta la actualidad, el enfoque basado en usar simulaciones numéricas para comprobar hipótesis ha florecido. A medida que avanzaba la tecnología, los conjuntos de datos astronómicos se enriquecieron, lo que suscitó la necesidad de interpretaciones y predicciones teóricas cada vez más detalladas. Al mismo tiempo, el uso de ordenadores se generalizó, aumentó su velocidad de cálculo y mejoró la calidad de los algoritmos computacionales. De manera inexorable, los cálculos obtenidos con grandes simulaciones evolucionaron hasta parecerse en tamaño, detalle y complejidad a los conjuntos de datos experimentales.

Los astrofísicos computacionales proceden en la actualidad de tres ámbitos: ingenieros que elaboran el código, investigadores que formulan hipótesis y diseñan experimentos numéricos, y otros que procesan e interpretan la gran cantidad de resultados. Los centros de superordenadores funcionan casi como observatorios astronómicos. Para bien o para mal, esta tercera forma de establecer la verdad científica ha venido para quedarse.

LA BÚSQUEDA DE LA VERDAD

En una serie de conversaciones durante el almuerzo con Piet Hut, astrofísico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, descubrí que a ambos nos preocupaban las consecuencias del uso creciente de simulaciones numéricas. La astrofísica computacional ha adoptado parte de la terminología tradicionalmente asociada a las ciencias empíricas. Las simulaciones pueden considerarse con legitimidad experimentos numéricos, tan sujetas a suposiciones, advertencias y limitaciones como un experimento realizado en un laboratorio. Los resultados simulados se describen a menudo como «empíricos», término habitualmente reservado para hacer referencia a los fenómenos naturales. Y los números generados por un ordenador reciben el nombre de «conjuntos de datos», lo que parece situarlos en pie de igualdad con las observaciones de la naturaleza.

El Proyecto Simulación del Milenio nos proporciona un ejemplo pionero de esta estrategia. Concebido y ejecutado por el Instituto Max Planck de Astrofísica de Múnich, persigue simular todo el universo en una caja, con el objetivo de esclarecer la estructura última del cosmos. Los conjuntos de datos generados en estas simulaciones se usan con tanta profusión que ya se celebran congresos dedicados por completo a ellos. La imitación ha suplantado a los datos astronómicos.

No es ningún disparate afirmar que todo estudio teórico de la naturaleza se reduce a una aproximación. Ninguna ecuación describe todos los fenómenos físicos del universo. Y, si existiese, su resolución sería prohibitiva, por no decir imposible. La ecuación de Schrödinger se aplica al mundo cuántico en ausencia de gravedad. Las de Navier-Stokes proporcionan una descripción macroscópica de los fluidos. Las ecuaciones de Newton especifican el comportamiento de la gravedad en condiciones similares a las terrestres, pero en situaciones más exóticas deben suplantarse por las de Einstein.

Para entender las órbitas de los exoplanetas, la mayoría de las veces basta con usar la gravedad newtoniana. Para analizar

sus atmósferas debemos considerarlas fluidos, pero también estudiar las manifestaciones macroscópicas de algunas de las propiedades cuánticas de sus moléculas, como la manera en que absorben y dispersan la luz. Cada una de las ecuaciones que gobiernan dichos fenómenos se basa en una ley de la naturaleza, como la conservación de la masa, la energía o el momento, o bien de otras cantidades más abstractas, como la vorticidad potencial. Se selecciona la ecuación apropiada y se resuelve en las condiciones físicas relevantes. De esta manera, se obtiene un modelo que capta un subconjunto limitado de las propiedades físicas de un sistema. En ocasiones se abusa del término, ya que un «modelo» que no se base en una ley de la naturaleza tiene poco derecho a ser llamado así.

LA NECESIDAD DE ESTÁNDARES DE CALIDAD

Una limitación fundamental de cualquier simulación reside en la finura con que podemos rebanar el espacio y el tiempo en nuestro ordenador para que los cálculos concluyan en un tiempo razonable (por ejemplo, el que se tarda en finalizar una tesis doctoral). Pero, al considerar problemas en los que concurren múltiples escalas, siempre habrá fenómenos que sucedan en escalas menores que el tamaño de los «píxeles» de nuestra simulación. Los astrofísicos hablan de «física subreticular» para referirse a tales procesos. La dificultad para reproducir en un ordenador fenómenos que abarcan una gran cantidad de órdenes de magnitud, desde el ámbito microscópico al macroscópico, se conoce como «problema del intervalo dinámico». A medida que aumenta la potencia de los ordenadores, las simulaciones pueden subdividir el espacio y el tiempo en unidades cada vez menores y, con ello, explorar un mayor abanico de tamaños. Pero, en problemas con múltiples escalas, siempre habrá fenómenos subreticulares que no puedan resolverse.

La astrofísica y la climatología parecen compartir esta pesadilla. Al simular la formación de galaxias, hemos de tener en cuenta que su aspecto global queda determinado por los procesos de nacimiento, evolución y muerte de las estrellas. Pero, mientras que una galaxia se extiende decenas de miles de años luz, la física estelar procede en escalas unos 11 órdenes de magnitud menores. Por otro lado, el clima terrestre depende de manera clave de las nubes, las cuales pueden tanto enfriar como calentar la atmósfera. A escalas de entre decenas y centenares de kilómetros, lo que importa es el resultado neto de ambos efectos. Pero, para calcularlo en detalle, hemos de entender la manera en que se forman las nubes y cómo aparecen sus propiedades emergentes, lo que, en última instancia, exige comprender la constitución de las pequeñas partículas que sirven como núcleos de condensación. Por sorprendente que parezca, la incertidumbre acerca de los procesos que ocurren a escalas tan pequeñas dificulta predecir si un determinado exoplaneta será potencialmente habitable o no. La formación de nubes sigue siendo un problema abierto en varias disciplinas científicas. En general, simular el abanico completo de fenómenos plantea todo tipo de retos, ya que, además de exigir un tiempo de cálculo prohibitivo, aún no comprendemos como es debido la física relevante a las escalas más pequeñas.

Otra preocupación legítima reside en usar las simulaciones como «cajas negras» que generan resultados, gráficos y vídeos, pero sin cuestionar las suposiciones que entrañan. En las simulaciones en que intervienen las ecuaciones de Navier-Stokes, por ejemplo, a menudo se supone un fluido newtoniano. Estos se caracterizan por no guardar «memoria» de sus configuraciones pasadas y por oponer una mayor resistencia cuando sus capas se deslizan una sobre otra. Los fluidos newtonianos constituyen un

Los detalles macroscópicos que caracterizan la atmósfera de un planeta...

... derivan del comportamiento de las nubes, ...

... cuya formación depende de las pequeñas partículas que actúan como núcleos de condensación.

A su vez, todo el proceso queda subordinado a la absorción y la dispersión de calor, determinadas por las propiedades microscópicas de átomos y moléculas.

DEL ÁTOMO A LOS PLANETAS: La interdependencia de los fenómenos que ocurren a escalas muy diversas resulta muy difícil de recrear en un ordenador. La atmósfera de un planeta proporciona un ejemplo en el que la física macroscópica depende, en última instancia, de las propiedades de los átomos y moléculas que la componen.

punto de partida verosímil para simular todo tipo de situaciones, desde atmósferas planetarias hasta los discos de acreción de los agujeros negros. Sin embargo, numerosos fluidos comunes presentan un comportamiento muy distinto. La masa de repostería guarda cierta memoria de su estado anterior, mientras que el kétchup tiende a volverse menos viscoso cuanto más se deforma. Simular el comportamiento de estos fluidos suponiendo que son newtonianos constituye un ejercicio inútil.

Para utilizar una simulación a modo de laboratorio hay que saber interrumpirla; de lo contrario, correremos el riesgo de confundir un resultado espurio con uno verdadero. Aproximar un medio continuo por otro discreto acarrea múltiples consecuencias indeseadas, como la aparición de oscilaciones ficticias o de una viscosidad aumentada, las cuales pueden confundirse con un fenómeno físico genuino. La conservación de la masa, el momento o la energía no están garantizadas en todas las simulaciones, ya que dependen del esquema numérico que se emplee —por más que, sobre el papel, las ecuaciones relevantes conserven a la perfección todas esas cantidades.

A pesar de todos esos obstáculos, parece estar prevaleciendo una cultura de «mayor, mejor, más rápido». No resulta extraño escuchar debates sobre cómo elaborar un código cada vez más complejo y que pueda ejecutarse en un número descomunal de núcleos. Como si el acopio de grandes cantidades de información se tradujera automáticamente en conocimiento, o

como si el sistema simulado fuese a adquirir consciencia de sí mismo. Pero, a medida que acumulamos teraoctetos y teraoctetos de datos en simulaciones cada vez más descomunales, crece la brecha que separa la información del conocimiento. Se diría que, para evitarlo, necesitamos un conjunto de principios rectores; una «astrofísica metacomputacional», a falta de un nombre mejor.

Algunas preguntas que deberíamos plantearnos son las siguientes. ¿Qué modelo representa mejor la verdad científica, el más sencillo o el más complejo? Muchos dirían que el más sencillo, aunque dicha opinión no goza de una aceptación universal. ¿Cómo juzgar si una simulación se aproxima con éxito a la realidad? Por ejemplo, la comparación visual de una galaxia simulada y otra observada con un telescopio puede resultar satisfactoria desde un punto de vista sentimental, pero no desde uno objetivo. ¿Cuándo es suficiente que una simulación sea «mayor, mejor y más rápida»? ¿Mejoran las respuestas que buscamos por el simple hecho de incrementar la complejidad de los cálculos?

Una estrategia alternativa consiste en construir una jerarquía de modelos de complejidad variable y que permita comprender un problema en etapas, aislando cada efecto físico. Tales jerarquías son corrientes en climatología, donde los cálculos relativos a algunos microprocesos, como la turbulencia o la formación de nubes, refuerzan las simulaciones globales de la interacción entre atmósfera, hidrosfera, biosfera, criosfera y litosfera.

REPRODUCIBILIDAD Y FALSABILIDAD

El aumento de la complejidad de las simulaciones suscita también varias preguntas relacionadas con la praxis científica. En astrofísica no resulta extraño encontrar artículos publicados en los que se omite la información necesaria para reproducir los resultados de una simulación. Con frecuencia, los códigos resultan tan complejos que se necesitarían años y la absoluta dedicación de todo un equipo de expertos para recrear por completo uno de ellos. Un pequeño grupo monopoliza la verdad científica que se impone al resto. Pero, si los resultados no pueden reproducirse con facilidad —aun admitiendo que el significado de «facilidad» tiene un alcance claramente subjetivo—, ¿podemos seguir hablando de ciencia?

Hay grupos e individuos que han adoptado la estrategia, más moderna, de hacer públicos sus códigos. Esta opción presenta la enorme ventaja de que las tareas de revisión, puesta a prueba, validación y depuración ya no recaen sobre un solo individuo, sino sobre toda la comunidad. Algunos opinan que ello equivale a la revelación de secretos comerciales, pero hay ejemplos notables de investigadores cuyas carreras han florecido, en parte, por poner sus códigos informáticos a la libre disposición de la comunidad.

Un pionero en esta práctica fue Sverre Aarseth, astrofísico de Cambridge que escribió y liberó códigos que calculaban la evolución de cuerpos celestes de diverso tipo, como planetas o estrellas, bajo la influencia de la gravedad. Jim Stone, de Princeton, y Romain Teyssier, de Zúrich, son conocidos por sus códigos para resolver las ecuaciones de fluidos magnetizados, usados en una amplia variedad de problemas en astrofísica. Volker Springel, de Heidelberg, se hizo un nombre gracias a su trabajo para el Proyecto Simulación del Milenio. En todos estos casos, los códigos de dominio público adquirieron importancia porque otros investigadores los incorporaron a su repertorio.

Una cuestión relacionada con lo anterior es la falsabilidad. Cuando un sistema físico se entiende por completo, no hay libertad para especificar la información inicial que necesita el modelo, lo que en términos técnicos se denominan «parámetros libres». Determinar el modo en que el átomo de sodio absorbe la luz nos proporciona un buen ejemplo. Es todo un triunfo de la mecánica cuántica que dicho cálculo no necesite parámetros libres. Pero, en las simulaciones a gran escala, siempre persisten aspectos pobre o parcialmente comprendidos, lo que obliga a simularlos con modelos aproximados que incluyan parámetros libres. A menudo, estos pseudomodelos no se basan en leyes fundamentales de la física, sino que dependen de otras simulaciones menores o de funciones calibradas *ad hoc* a partir de datos experimentales, las cuales pueden no resultar válidas en todas las situaciones.

Un caso lo hallamos en la capa límite planetaria de la Tierra, la cual se genera a partir del rozamiento entre el flujo atmosférico y la superficie del planeta. Dicha capa desempeña un papel clave en el balance energético del sistema climático. Sin embargo, su espesor exacto depende de la naturaleza de la superficie (zonas urbanas, praderas, océanos...), lo que implica una complejidad imposible de implementar de forma directa y viable en una simulación climática a gran escala. Ello obliga a emplear fórmulas empíricas sobre el espesor de la capa límite e introducirlas en la simulación. Pero aplicar sin miramientos este método a otros planetas supone entrar en un terreno muy pantanoso. En este sentido, resulta preocupante la existencia de un incipiente conjunto de investigadores que, procedentes del campo de ciencias de la Tierra, han comenzado a aplicar estas y otras aproximaciones «terracéntricas» al estudio de exoplanetas.

A la hora de estudiar la formación de galaxias, necesitamos una prescripción que nos diga cómo incorporar los procesos de formación estelar y la manera en que las supernovas inyectan energía en el entorno. Para simular el clima, hemos de incluir de algún modo la turbulencia y las precipitaciones. A menudo, todas estas recetas se apoyan en una gran cantidad de parámetros libres que, o bien carecen de apoyo empírico suficiente, o bien dependen de física poco conocida.

Al aumentar el número de parámetros libres en una simulación, también lo hacen la cantidad y la diversidad de los resultados. En el caso extremo, una simulación puede predecirlo todo, mostrarse compatible con cualquier resultado. Como dijo una vez John von Neumann: «Con cuatro parámetros puedo ajustar un elefante, y con cinco puedo hacer que mueva la trompa». La falta de atención al criterio de falsabilidad fue censurada por Wolfgang Pauli, a quien se le atribuye la frase: «No solo es incorrecto; ni siquiera es falso». Una simulación no falsable difícilmente puede considerarse parte de la ciencia.

Las simulaciones como tercera vía para establecer la verdad científica han venido para quedarse. El reto para la comunidad astrofísica consiste en emplearlas como herramientas transparentes y reproducibles, a fin de que se sitúen en el mismo nivel de credibilidad que la teoría y la experimentación.

PARA SABER MÁS

The value of science: Essential writings of Henri Poincaré. Dirigido por Stephen Jay Gould. Modern Library, Nueva York, 2001.

A meeting with Enrico Fermi. Freeman Dyson en *Nature*, vol. 427, pág. 297, enero de 2004.

The gap between simulations and understanding in climate modeling. I. M. Held en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, págs. 1609-1614, noviembre de 2005.

por Mark Buchanan

Mark Buchanan, físico teórico, es escritor y columnista de *Nature Physics*.



La innovación pierde fuelle

La invención de técnicas completamente nuevas es cada vez menos frecuente

En un estimulante artículo publicado en agosto de 2012, el economista Robert Gordon, de la Universidad Noroccidental de EE.UU., se preguntaba si el rápido crecimiento económico y tecnológico de los últimos siglos no habrá sido un fenómeno transitorio que ha llegado ya a su fin —una tesis en clara contradicción con la creencia actual en la naturaleza desbordantemente creativa y «disruptiva» de las industrias tecnológicas de hoy.

Lo cierto es que un crecimiento de ese tipo no ha sido la norma a lo largo de la historia. Hasta 1700, los humanos estuvieron viviendo más o menos de la misma forma que hacía miles de años. Llegó entonces la Revolución Industrial, con sus oleadas de cambio en la ciencia y la técnica. Hoy nos encontramos en el frente posterior de esa explosión, y casi todo el mundo espera que continúe, quizás incluso que se acelere, y nos impulse hacia un futuro que apenas podemos imaginar. Pero cabe también dentro de lo posible, apuntaba Gordon, que los últimos doscientos años hayan sido el reflejo de nuestra expansión intelectual a través de un campo abierto donde abundaban los descubrimientos hasta cierto punto fáciles y que cada vez resulte más difícil inventar técnicas realmente revolucionarias.

Pensemos en el transporte. Hacia 1800, la manera más rápida de viajar la proporcionaba el caballo; llegaron luego el tren de vapor y los vehículos a motor, y todavía después los aviones de hélice y los reactores. A mediados de los años cincuenta se alcanzaron velocidades de 800 kilómetros por hora. Hoy, la velocidad se ha estancado e incluso ha disminuido por la necesidad de ahorrar combustible.

Un equipo dirigido por Hyejin Youn, de la Universidad de Oxford, ha estudiado el ritmo de la innovación a partir de las patentes estadounidenses concedidas a lo largo de más de doscientos años. A tenor de sus resultados, quizá no le falte razón a Gordon.

La Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU. protege los inventos por medio de patentes y los define como «conjuntos de capacidades técnicas ligadas». Cada patente se etiqueta con una ristra de códigos que describen las capacidades técnicas que el invento asociado emplea. El trabajo de Youn muestra algunas tendencias interesantes. En el siglo XIX, casi la mitad de las patentes correspondían a inventos de código simple, es decir, basados en una sola técnica. Esta proporción declinó paulatinamente a lo largo del siglo XX y hoy ronda el 12 %. Los inventos por combinación, en cambio, se han convertido en la norma. Al menos durante el siglo pasado, hemos creado inventos más deprisa que técnicas.



THINKSTOCK/VLADGRIN

El paso a la innovación combinatoria se manifiesta también en la evolución del número total de patentes, de códigos y de combinaciones de códigos. Desde 1790, los tres crecieron exponencialmente durante ochenta años, período (estrechamente ligado a los comienzos de la Revolución Industrial) donde la mayoría de los inventos guardaba relación con técnicas nuevas. Las cosas cambiaron a partir de 1870, cuando el crecimiento del número de códigos de técnicas se frenó y quedó por detrás del crecimiento del número de patentes y del de combinaciones nuevas. En otras palabras, la naturaleza de la invención cambió a partir de 1870: se fueron inventando nuevas técnicas más despacio, pero siguieron creándose nuevos inventos tan deprisa como antes, coordinando viejas técnicas de nuevas maneras. Desde entonces, la invención ha sido esencialmente combinatoria y ha seguido un patrón bastante regular: un 40 % de los inventos han reutilizado una combinación ya existente de técnicas, mientras que un 60 % han introducido una combinación completamente nueva.

Aun así, la invención ha sido más creativa en unos períodos que en otros. Valiéndose de los códigos de técnicas, es posible calcular, en un período dado, la proporción de inventos que se crearon coordinando técnicas muy dispares y la de los que mezclaban técnicas pertenecientes a un solo dominio. A los primeros se los podría llamar inventos «amplios»; a los segundos, «estrechos». Los datos muestran que, antes de 1930, las combinaciones amplias correspondían a la mitad de los inventos; en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial (de las que suele decirse que fueron particularmente creativas para la economía estadounidense), ese porcentaje aumentó de golpe al 70 %, y, a partir de 1970, disminuyó de nuevo hasta el 50 %.

En resumidas cuentas, la invención de técnicas nuevas desempeña hoy un papel mínimo en la innovación, lo que concuerda con la idea defendida por Gordon de que los avances técnicos serán cada vez más lentos o, al menos, graduales. Si ello es cierto, entrañará enormes consecuencias para las economías actuales, que requieren que la innovación vaya deprisa.

Pero quizá estemos a punto de irrumpir en algún dominio nuevo de la ciencia, radicalmente diferente de nada que podamos hoy imaginar y donde las innovaciones fáciles serán de nuevo posibles (no cabe duda de que hay campos prometedores, como la biología sintética o la nanociencia). O quizás encontremos la innovación rápida donde más la necesitamos de verdad: no en física ni en ingeniería, sino en las técnicas para abordar problemas sociales y estimular la cooperación ante los problemas globales. Sería toda una sorpresa.

Artículo original publicado en *Nature Physics* vol. 11, enero de 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

por José Luis Nieves Aldrey

Agallas vegetales

Estas excrecencias anómalas de las plantas ofrecen alimento y protección a las larvas de insectos

Las agallas vegetales, o cecidias, representan una de las interacciones más complejas entre plantas y animales que existen en la naturaleza. Entre ambos organismos se establece una relación de carácter obligado, en la que la planta se ve forzada a responder al estímulo producido por el inductor de la agalla, normalmente un insecto. Se originan así estructuras morfológicas vegetales anómalas, las cuales sirven de alimento, cobijo y protección para el desarrollo larvario del insecto. Aunque están formadas por tejidos de la planta, su desarrollo y morfología están controlados en gran parte por los genes del animal, hasta el punto de que la agalla puede considerarse un auténtico «fenotipo ampliado» del insecto.

La capacidad de inducir agallas ha evolucionado varias veces de forma independiente en distintos órdenes de insectos. Como resultado, algunos linajes de insectos gallícolas se han diversificado enormemente. Cabe destacar las avispas de las agallas, o cinípidos, del orden de los himenópteros, y la familia Cecidomyiidae, del orden de los dípteros.

La extraordinaria variedad de formas, tamaños y estructuras de las cecidias responde a la gran diversidad de insectos que las producen (se estiman unas 15.000 especies en todo el mundo) y a la pluralidad de especies botánicas afectadas. Entre las agallas más diferenciadas y complejas se hallan las de los cinípidos. En su gran mayoría se producen en fagáceas del género *Quercus*, es decir, en robles, quejigos, encinas y alcornoques. No resulta infrecuente que un solo ejemplar de roble albergue a la vez más de veinte especies de cinípidos.

Las agallas presentan a menudo estructuras protectoras externas, entre ellas cubiertas formadas por tejidos ricos en taninos, superficies pegajosas o envolturas erizadas de pelos o espinas. Se cree que estas han sido moldeadas por la evolución en respuesta al ataque de enemigos naturales, principalmente avispas parasitoides que efectúan la puesta sobre las larvas de los insectos que han inducido las agallas.

Nuestro grupo trabaja en distintas facetas de la taxonomía y ecología de las cecidias de zonas templadas y tropicales desde hace más de treinta años. Nos interesan la biología de los insectos gallícolas y el funcionamiento de sus microhábitats, en particular, las redes tróficas intrincadas de inquilinos, parasitoides y sucesores que forman estas comunidades cerradas de especies.

—José Luis Nieves Aldrey
Departamento de biodiversidad y biología evolutiva
Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC)
Madrid



AGALLAS DEL ROSAL SILVESTRE inducidas por el cinípido *Diplolepis mayri*. En el interior de una de ellas predominan las larvas del insecto y, además, se desarrolla la de otro cinípido inquilino (*Periclistus brandtii*, *flecha*).



DIVERSIDAD DE FORMAS. Las agallas presentan una enorme variedad morfológica y estructural. En las imágenes se observan las formadas por el cinípido ibérico *Trigonaspis mendesi* sobre hojas de quejigo (*a*), el pulgón *Eriosoma lanuginosum* en el olmo (*b*) y el cinípido *Cynips quercusfolii* en el roble (*c*).

por Héctor Velázquez Fernández

Héctor Velázquez Fernández es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad Panamericana en Ciudad de México.



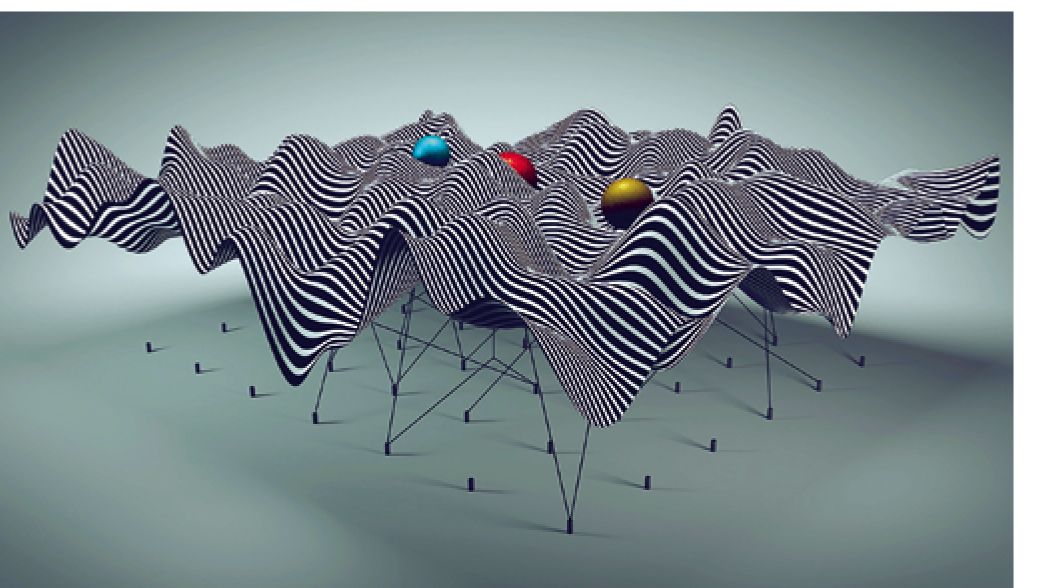
Naturaleza y finalidad

¿Hay espacio para la explicación teleológica en la ciencia actual?

Con la publicación de su *Mind and cosmos* (Oxford University Press, 2012), el filósofo de la Universidad de Nueva York Thomas Nagel puso en discusión la pertinencia de un naturalismo materialista que, desde la biología evolutiva, pretende hacer de la selección natural la única y universal clave explicativa. Esta posición representa para Nagel una lectura incompleta del fenómeno biológico, si atendemos a la aparición de mentes conscientes en el universo, con conocimiento intelectual y criterios valorativos, así como al hecho de que dicha aparición no ha sido aún satisfactoriamente explicada.

En su polémico texto, Nagel apuesta por una reconfiguración de las bases metodológicas de la ciencia. Propone incluir la consideración de leyes naturales teleológicas (asociadas a fines o propósitos), que gobernarían el desarrollo de la organización a lo largo del tiempo y que complementarían la explicación científica más común, que suele ofrecerse en términos de causalidad eficiente y que es propia de las leyes cuantitativas de la física.

La polémica suscitada por la propuesta de Nagel ha tenido eco incluso en grandes medios de comunicación, como *The New York Times*. No es extraño, dado que era un tópico asumido que, desde la matematización del mundo físico emprendida por Galileo, fue desterrada de las ciencias naturales toda referencia a causas no mensurables, como por ejemplo la formal y la final.



EN LOS PAISAJES EPIGENÉTICOS de Conrad Hal Waddington, el movimiento de unas canicas por un relieve accidentado ofrece una metáfora del desarrollo embrionario; las canicas siguen el cauce de los canales y terminan en los puntos de menor elevación local, lo mismo que las células evolucionan según varios factores ontogéneticos y se acaban diferenciando en un tipo concreto. La ilustración corresponde a un fotograma de la animación *Epigenescape 1*, una reinterpretación moderna de los paisajes de Waddington según Mhairi Towler, Link Li y Paul Liam Harrison, artista residente en el consorcio europeo de investigación EpiGeneSys.

Sin embargo, en las últimas décadas, los crecientes debates en torno a temas como el principio antrópico, la teleonomía o el «ajuste fino» del universo, sugerirían una eventual restitución del concepto de finalidad en las ciencias naturales o, al menos, la apertura de un lugar para la discusión sobre su utilidad explicativa dentro del conocimiento del cosmos, la vida y la mente.

Teleología es un término acuñado por Christian Wolf en su *Philosophia Rationalis sive Logica* (1728), para designar la parte de la filosofía natural que estudia el fin al que tienden las cosas. Ya desde la antigüedad, el griego *télos* y su correspondiente latino *finis* aludían a cierta fijación, sujeción o dirección de una realidad hacia estados preferentes; a manera de destino. El *télos* sería un estado o condición óptima, excelente o plena, diversa del estado inacabado o incompleto, propio de lo que aún no habría alcanzado su *télos*.

El helenismo epicúreo acuñó la objeción que recurrentemente se ha formulado a lo largo de la historia contra la existencia de fines en la naturaleza: un fin, entendido como un estado futuro aún no ocurrido, no puede situarse por delante del estado presente a manera de atractor, a riesgo de pretender que lo irreal guíe los fenómenos presentes reales.

Con los siglos, la escolástica medieval multiplicó la semántica de la causa final: la llamó intención, propósito, objetivo; causa final interna y externa, inmanente y trascendente, principal y secundaria, relativa y absoluta, natural y sobrenatural, etcétera. Pero, en todo caso, con una connotación de algo acabado, completo e ideal.

Fue en la modernidad cuando la idea de teleología adquirió un carácter más bien metafórico o retórico, con la irrupción de la noción de ley natural física como explicación única del funcionamiento natural.

Hoy en día, algunos autores, como Nagel, sugieren que la finalidad o teleología podría tener algún papel explicativo incluso en las ciencias naturales, sobre todo en lo referido a eventos particulares tendenciales, ordenados de modo continuado en el tiempo y dirigidos a ciertas metas previsibles, como ocurre en el despliegue de la información genética. El carácter tendencial de los procesos genéticos se ilustra, por ejemplo, en los «paisajes epigenéticos» de Conrad Hal Waddington (quien acuñó el término *epigenética*), metáforas visuales que este biólogo del desarrollo y filósofo ideó para explicar el modo en que la regulación genómica determina la diferenciación celular (*ilustración*).

La naturaleza presentaría, según esa postura, comportamientos finalísticos, como direccionalidad, cooperatividad y funcionalidad. Todo ello explicaría la presencia de pautas en diversos niveles de la naturaleza, niveles que van desde las partes que componen un organismo hasta el funcionamiento armónico de los ecosistemas.

Pero hablar de fenómenos finalísticos o teleológicos exige una precisa distinción semántica que permita valorar la pertinencia de su inclusión dentro de la explicación de la naturaleza. En efecto, no es lo mismo entender *fin* al modo de «final de un proceso» (como cuando sabemos que el nacimiento es el final del desarrollo de un embrión), a considerarlo como «meta de una tendencia» (cuando un animal consigue reproducirse después del cortejo), o como un «valor para un sujeto» (cuando hacemos de nuestras razones los fines de la acción consciente), o bien como «objetivo de un plan» (cuando un ejército desarrolla la estrategia programada).

De entre todos ellos, el fin entendido como meta de una tendencia reflejaría el papel que la finalidad podría desempeñar en la explicación actual del mundo natural en su conjunto. No podría tratarse de un fin a manera del final de un proceso, pues ello supondría que el cosmos estaría en un estado definitivo e invariable, cuya situación ya no seguiría evolucionando. Y tampoco de la finalidad como valor para un sujeto, pues supondría que la naturaleza eligiría conscientemente sus dinamismos. Y mucho menos como objetivo de un plan, pues ello implicaría un programa trazado para el cosmos entero, que solo podría revelar quien lo hubiera elaborado.

Para algunos, los antecedentes contextuales de la teleología nos obligarían a buscar nuevas nomenclaturas para designar fenómenos tendenciales en la naturaleza. De ahí la sustitución que proponen del término *teleología* por *teleonomía* y *teleomatismo*. La teleonomía alude a fenómenos en los que los resultados se obtienen a partir de la estructura del sistema, como el desarrollo embrionario, el funcionamiento del sistema nervioso o el equilibrio de los ecosistemas, mientras que teleomatismo se refiere a procesos como la fuerza gravitatoria, la desintegración radiactiva o el aumento de la entropía.

Según ese vocabulario, los sistemas físicos presentan actividades teleomáticas, mientras que un subconjunto de estos, los sistemas vivos, realizan actividades teleonómicas. A su vez, un subconjunto de los procesos teleonómicos, que se da en los seres vivos conscientes, serán actividades teleológicas. De tal manera que los procesos de mutación, deriva genética y evolución, por ejemplo, serían teleomáticos; y la ontogénesis, teleonómica; mientras que la noción de teleología se reservaría solo para el campo de la acción humana, sin posible aplicación a los fenómenos naturales.

Sobre la objeción que consideraba absurdo que un estado futuro e inexistente guíe los estados presentes, los partidarios de la teleonomía y el teleomatismo responden que en los seres vivos los procesos se presentan de modo cíclico; por lo que el estado final futuro, de alguna manera, se ha presentado ya. No se trata de un estado futuro, sin más. Lo sería solo en referencia al individuo, pero no en cuanto a la especie y a su acervo genético, porque el desarrollo ontogenético está prefigurado en la información genética. Y en los fenómenos no biológicos, la naturaleza estadística y matemática de las leyes haría irrelevante que dicho estado tendencial fuera planteado previa o posteriormente al suceso que explica, por lo que la objeción de que el fin es un acontecimiento futuro tampoco procedería.

Obviamente, es discutible la pertinencia de construir nuevos vocablos para hablar de fenómenos tendenciales naturales con tal de no mencionar a la teleología. Sin embargo, parece claro que postular para la finalidad un papel explicativo respecto a la naturaleza no implica convertir a esta en un agente consciente y racional que decidiera llegar a los estados de organización actual.

En los inicios del siglo XX la finalidad se consideraba una vía de explicación inválida (porque se juzgaba como una extrapolación antropocéntrica en la interpretación de lo material), inútil (porque se pensaba que retrasaría el verdadero conocimiento del cosmos), imposible o incognoscible (porque no habría fenómenos naturales que la respaldaran ni métodos que la pudieran registrar) e ilegítima (porque se trataría de una aparente intromisión en la naturaleza física de argumentos más pertenecientes al mundo de la conducta humana). A pesar de todo ello, asistimos actualmente a una revaloración de las explicaciones finalistas mediante la distinción entre procesos teleonómicos, teleomáticos y teleológicos.

¿Cómo podemos, pues, emitir un juicio justo sobre la pertinencia de incluir o no la finalidad entre las explicaciones naturales? Como ha sugerido, entre otros, Nagel, la clave consiste en distinguir adecuadamente la multiplicidad de sentidos de *fin*. Esta distinción viene exigida por el rigor epistémico y, además, nos invita a reconocer que la realidad se nos manifiesta con diversas exigencias explicativas. Una visión reduccionista, que excluya toda explicación finalista, puede acabar por pasarnos factura en cuanto a la comprensión de la riqueza de la realidad.

Las preguntas que nos hacemos los humanos son múltiples y requieren respuestas en planos muy diversos. No es lo mismo interrogarse sobre lo puramente natural que sobre lo humano, lo cultural, lo metafísico o lo religioso. Pero, incluso hablando en particular del mundo natural, conviene explorar la inclusión de diversas nociones con sugerente carácter explicativo, como lo es la de finalidad. Ello parece traer consigo más ventajas que inconvenientes.

PARA SABER MÁS

La mente del universo. Mariano Artigas, EUNSA, Pamplona, 1999.

¿Qué es la naturaleza? Introducción filosófica a la historia de la ciencia. Héctor Velázquez, Porrúa, 2007.

Figuras contemporáneas de la teleología. Alfredo Marcos en *Diálogo Filosófico*, vol. 83, págs. 4-32, 2012.

Los sótanos del universo. La determinación natural y sus mecanismos ocultos. Juan Arana, Biblioteca Nueva, 2012.

Neo-finalisme. Raymond Ruyer. Presses universitaires de France, 2012.

La mente y el cosmos. Por qué la concepción neodarwinista materialista de la naturaleza es, casi con certeza, falsa. Thomas Nagel, Biblioteca Nueva, 2014.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 12,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

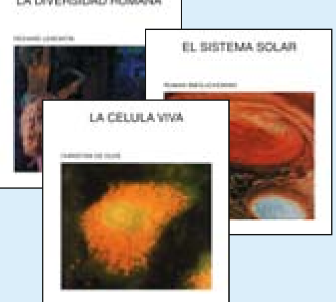
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer

(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones



SISTEMA SOLAR

El Origen del agua en la Tierra

Varios hallazgos recientes han reavivado el debate sobre la génesis de los océanos. ¿Llegó el agua a nuestro planeta a bordo de cometas, asteroides o mediante algún otro proceso?

David Jewitt y Edward D. Young



David Jewitt es miembro de la Academia Nacional de las Ciencias de EE.UU. y catedrático del departamento de ciencias espaciales y de la Tierra de la Universidad de California en Los Ángeles. Su trabajo se centra en la formación del sistema solar, el sistema solar exterior y las propiedades físicas de los cometas.



Edward D. Young es catedrático de geoquímica y cosmoquímica de la Universidad de California en Los Ángeles y miembro del Instituto de Planetas y Exoplanetas, de la misma universidad. Investiga los orígenes del sistema solar a partir de las propiedades químicas de los meteoritos, el medio interestelar y otras estrellas.



DESDE LA PLAYA, AL CONTEMPLAR LAS OLAS ACERCARSE DESDE EL HORIZONTE, ES FÁCIL concebir el océano como algo atemporal. De hecho, más de un mito de la creación comienza con un abismo de agua anterior a la tierra e incluso a la luz. Hoy, sin embargo, sabemos que nuestros mares no han estado ahí siempre. El agua que contienen, al igual que cada gota de lluvia, cada ráfaga de aire húmedo y cada sorbo de nuestros vasos, constituye un vestigio de un tiempo remoto en el que, literalmente, los océanos cayeron del cielo.

Toda el agua del sistema solar se remonta a la gigantesca nube primordial de gas y polvo que, hace unos 4500 millones de años, sucumbió a su propio peso y dio lugar al Sol y los planetas. En ella abundaban el hidrógeno y el oxígeno, los dos elementos que conforman la molécula de agua. Esa riqueza no debería sorprender a nadie: el hidrógeno y el oxígeno ocupan, respectivamente, el primer y el tercer puesto en la lista de los elementos más abundantes en el universo (el helio, químicamente inerte, se encuentra en segundo lugar). El Sol y los planetas gigantes gaseosos, formados antes que los rocosos, absorbieron la mayor parte del gas. Y aunque buena parte del oxígeno se unió a átomos de otros elementos, como el carbono y el magnesio, el restante bastó para formar una cantidad de agua varias veces superior a toda la roca del sistema solar.

Sin embargo, hoy observamos una realidad muy distinta. La Tierra y sus vecinos, Mercurio, Venus y Marte, no son mundos de agua, sino de piedra. La razón se debe al momento y la manera en que se formaron. A medida que la nube primordial colapsaba, el momento angular aplanó el material y dio lugar a un disco rotatorio de gas y polvo, en el que más tarde nacerían los planetas. Se cree que la génesis de cuerpos rocosos siguió un proceso gradual, en el que los objetos de menor tamaño fueron agregándose para engendrar otros cada vez mayores. Los granos microscópicos formaron pequeños guijarros, los cuales crecieron hasta convertirse en grandes bloques y, más tarde, en planetesimales, objetos de dimensiones kilométricas cuya acumulación posterior daría lugar a los planetas. Concluida la etapa de formación planetaria, buena parte de los planetesimales restantes devinieron en asteroides y cometas.

En las regiones más internas del disco, próximas al Sol, la luz del astro y el intenso calor liberado por el rozamiento del gas probablemente causaron la sublimación del hidrógeno, el oxígeno y otros elementos ligeros. De esta manera, en el sistema solar interior solo quedó material relativamente «seco» para formar planetas. Así, mientras cerca del Sol crecían con rapidez cuerpos rocosos, en las inmediaciones de lo que hoy es el cinturón de asteroides y la órbita de Júpiter, el agua y otras sustancias volátiles formaron hielo. La zona de transición entre ambas regiones recibe el nombre de «línea de nieve». Según las teorías tradicionales, la mayor parte del agua llegó a nuestro planeta desde más allá de esa línea a bordo de asteroides y cometas helados. A su vez, estos habrían sido lanzados hacia el sistema solar interior por los planetas gigantes durante las últimas fases del proceso de formación planetaria.

Durante los últimos años, la observación de sistemas planetarios en formación en torno a estrellas distantes nos ha permitido estudiar sus líneas de nieve y las colisiones tardías entre planetesimales. Al escudriñar el espacio interestelar con nuestros telescopios, podemos contemplar desde la distancia procesos análogos a los que dieron origen al sistema solar. Sin embargo, la historia de formación de los océanos terrestres continúa planteando todo tipo de incógnitas. Por atemporales e inefables que puedan parecer nuestros mares, varios hallazgos recientes nos están ayudando a dilucidar cómo se gestaron, cuándo lo

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE RON MILLER

EN SÍNTESIS

Durante las etapas de formación planetaria, la mayor parte del agua del sistema solar quedó confinada en sus regiones externas, más frías. Ello condujo a la creación de cuerpos relativamente secos en las zonas más cercanas al Sol.

Se cree que el agua llegó a nuestro planeta durante las fases tardías de su proceso de formación. Algunos datos apuntan a un bombardeo de asteroides ricos en minerales hidratados; otros sugieren un origen cometario.

Sin embargo, puede que el problema del origen del agua terrestre no admita una solución única. En última instancia, la respuesta definitiva dependerá de una exploración más exhaustiva del sistema solar.

hicieron y si el agua llegó gracias a los cometas, a los asteroides o mediante algún otro proceso.

MÁS SECA QUE UN HUESO

Vista desde el espacio, la Tierra bien podría llamarse «el planeta marino». El agua tapiza más de dos tercios de su superficie y da cuenta de más de dos tercios de la composición de nuestros cuerpos. Los océanos presentan una profundidad media de cuatro kilómetros y contienen agua suficiente para llenar una esfera de más de 1300 kilómetros de diámetro. Aun así, a muchos sorprende el hecho de que toda esa agua suponga solo el 0,02 por ciento de la masa de la Tierra. Si nuestro planeta fuera un Boeing 777 de 300 toneladas, los océanos equivaldrían a un solo pasajero. El agua dulce almacenada en los casquetes polares, nubes, ríos, lagos, suelos y biota apenas añade una pequeña fracción a esa cifra.

Nuestro planeta también alberga agua en el manto, la capa de más de 3000 kilómetros que se extiende desde la corteza hasta el núcleo de hierro fundido. Esa agua no se encuentra en estado líquido, sino integrada en la estructura molecular de minerales «hidratados», los cuales han sido arrastrados hacia las profundidades por la tectónica de placas. Una parte de la humedad atrapada en ellos regresa ocasionalmente a la superficie por medio de procesos volcánicos, pero la mayoría permanece enterrada. A una profundidad mayor se encuentra el voluminoso núcleo de hierro y níquel. Este da cuenta de cerca del 30 por ciento de la masa del planeta y, potencialmente, alberga incluso más agua que el manto. Dicha «agua» se encuentra en forma de hidrógeno y oxígeno que, de no hallarse en condiciones de presión y temperatura tan extremas, formarían la molécula correspondiente.

Si la Tierra fuera un Boeing 777, la masa de los océanos equivaldría a la de un solo pasajero. Por extraño que parezca, nuestro planeta es unas cien veces más seco que un hueso viejo

Ignoramos cuánta agua contiene nuestro planeta en su interior. Ello se debe a la falta de muestras directas, así como a un escaso conocimiento sobre la eficiencia con que el agua se transporta hasta y desde la superficie. Una estimación razonable lleva a concluir que, solo en el manto, debería haber al menos tanta agua como en los océanos. Aún así, si regresamos a la analogía de nuestro Boeing 777, el agua no superaría los dos pasajeros. Por extraño que pueda parecernos, la Tierra es unas cien veces más seca que un hueso viejo. Con todo, la cuestión sobre el origen de su agua sigue hoy a la espera de una respuesta definitiva.

¿COMETAS O ASTEROIDES?

Dado que se considera que la Tierra primigenia era más seca que la actual, quienes han investigado la procedencia del agua se han centrado en las etapas relativamente tardías de la formación de nuestro planeta; en concreto, en aquellas posteriores al origen de la Luna.

Sin embargo, al igual que los otros planetas rocosos del sistema solar, la Tierra recién formada hubo de presentar una superficie parcialmente fundida durante, al menos, varias decenas de millones de años. Esa fusión habría sido provocada por una lluvia incesante de planetesimales grandes como montañas. Existen indicios geoquímicos de que aquel océano de magma primigenio ya contenía cierta cantidad de agua. Sin embargo, la roca fundida no es el mejor material para retener agua, por lo que se cree que buena parte de la humedad presente en la prototierra y los planetesimales habría escapado al espacio en forma de vapor y gas ionizado. Una porción se habría perdido, pero otra tal vez regresase para quedar nuevamente atrapada en la roca antes de incorporarse al manto.

Más tarde, otra sucesión de grandes impactos volvería a modificar el inventario acuático del planeta. Se cree que, hace unos 4500 millones de años, un cuerpo del tamaño de Marte colisionó contra la Tierra y arrancó una gran nube de material que, más tarde, se enfrió y dio lugar a la Luna. Semejante cataclismo habría barrido gran parte de la atmósfera, causado la ebullición inmediata de cualquier mar que cubriese el planeta y originado un océano de magma de cientos de kilómetros de profundidad. Por tanto, con independencia de si la Tierra se formó en condiciones más secas o más húmedas, la devastadora colisión que arrancó lo que hoy es la Luna tuvo que eliminar casi toda el agua primordial.

A la luz de tal hipótesis, los expertos llevan largo tiempo intentando identificar la procedencia del agua que llegó a nuestro planeta tras la formación de la Luna. Desde la década de los cincuenta, se sabe que los cometas se componen sobre todo de hielo y que llegan al sistema solar interior procedentes de dos enormes reservas exteriores: el cinturón de Kuiper, que comienza aproximadamente a partir de la órbita actual de Plutón, y la nube de Oort, situada mucho más lejos y que se cree que se extiende hasta la mitad de la distancia que separa al Sol de la estrella más cercana. Numerosos investigadores han considerado que los cometas bien podrían constituir la fuente principal de los océanos terrestres.

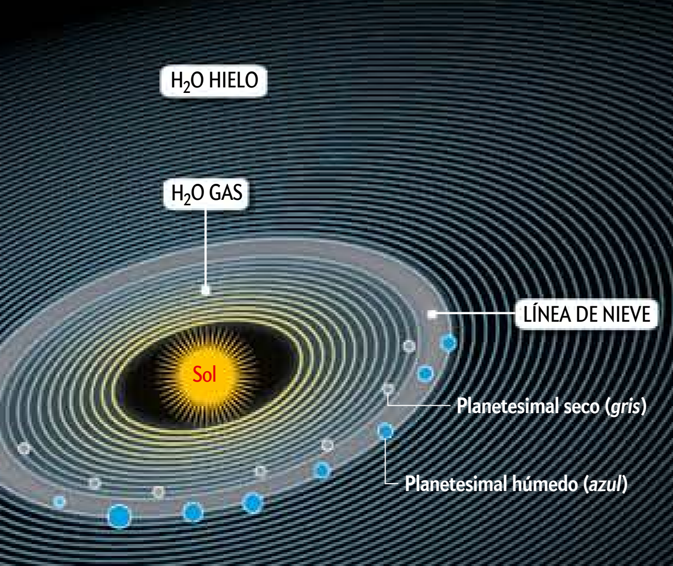
Esa hipótesis fue puesta en duda durante los años ochenta y noventa, cuando se efectuaron los primeros análisis de la proporción entre deuterio e hidrógeno (D/H) de los cometas de la nube de Oort. En astrofísica, la abundancia relativa de deuterio (un isótopo pesado del hidrógeno, cuyo núcleo se compone de un protón y un neutrón) se emplea para reconstruir la historia de un objeto. Si nuestros océanos se formaron a partir de cometas fundidos, la proporción D/H del agua marina y la de dichos astros debería ser similar. No obstante, el estudio de los cometas de la nube de Oort reveló una relación D/H dos veces mayor que la de los océanos terrestres. Por tanto, la mayoría del agua terrestre debería tener otro origen.

No obstante, durante los últimos años se ha comprobado que algunos cometas del cinturón de Kuiper presentan una proporción D/H muy similar a la de los océanos terrestres, lo que ha dado un nuevo impulso a la teoría de los cometas como origen del agua en nuestro planeta. A finales del año pasado, sin embargo, la misión Rosetta, de la ESA, halló que el cometa del cinturón de Kuiper 67P/Churyumov-Gerasimenko mostraba una relación D/H tres veces mayor que la de nuestros océanos [*véase* «Con los pies sobre nuestro pasado», por Josep M. Trigo; Investigación y Ciencia, enero de 2015]. Este descubrimiento, sumado a otros argumentos relacionados con la dinámica orbital

Continúa en la página 60

La turbulenta historia del agua terrestre

La Tierra no siempre estuvo bañada por océanos. Nuestro planeta se formó hace unos 4500 millones de años a partir del disco de gas y polvo que giraba alrededor del Sol primigenio. En él abundaban el hidrógeno y el oxígeno; sin embargo, la mayor parte del agua quedó relegada en forma de hielo a las zonas más externas del sistema solar, más allá de la conocida como «línea de nieve». La Tierra nació por agregación de planetesimales, bloques rocosos de dimensiones kilométricas. Aunque aquellos procedentes de las regiones más cercanas al Sol eran secos, los venidos desde más allá de la línea de nieve habrían conferido a nuestro incipiente planeta cierto volumen inicial de agua. Con todo, la formación de los océanos actuales habría requerido aportes posteriores. Los expertos debaten sobre si estos llegaron a bordo de asteroides, cometas u otros cuerpos.



Luna

4 CONSECUENCIAS

La Tierra es ahora un planeta seco que, poco a poco, se recupera del impacto que originó la Luna. Los volcanes y el material de impacto van reponiendo gradualmente la atmósfera.

Manto relativamente despojado de H_2O

Vulcanismo

5 ENFRIAMIENTO

El agua procedente del material caído sobre el planeta y de los gases volcánicos forma pequeños mares en una superficie en proceso de enfriamiento.

Inicio de la tectónica de placas

Nueva atmósfera con agua

Luna

6 APORTACIÓN TARDÍA

Una mezcla de asteroides y cometas llegados desde las regiones más externas del sistema solar, ricas en agua, bombardea el planeta. El vapor de la atmósfera condensa y da lugar a los océanos.

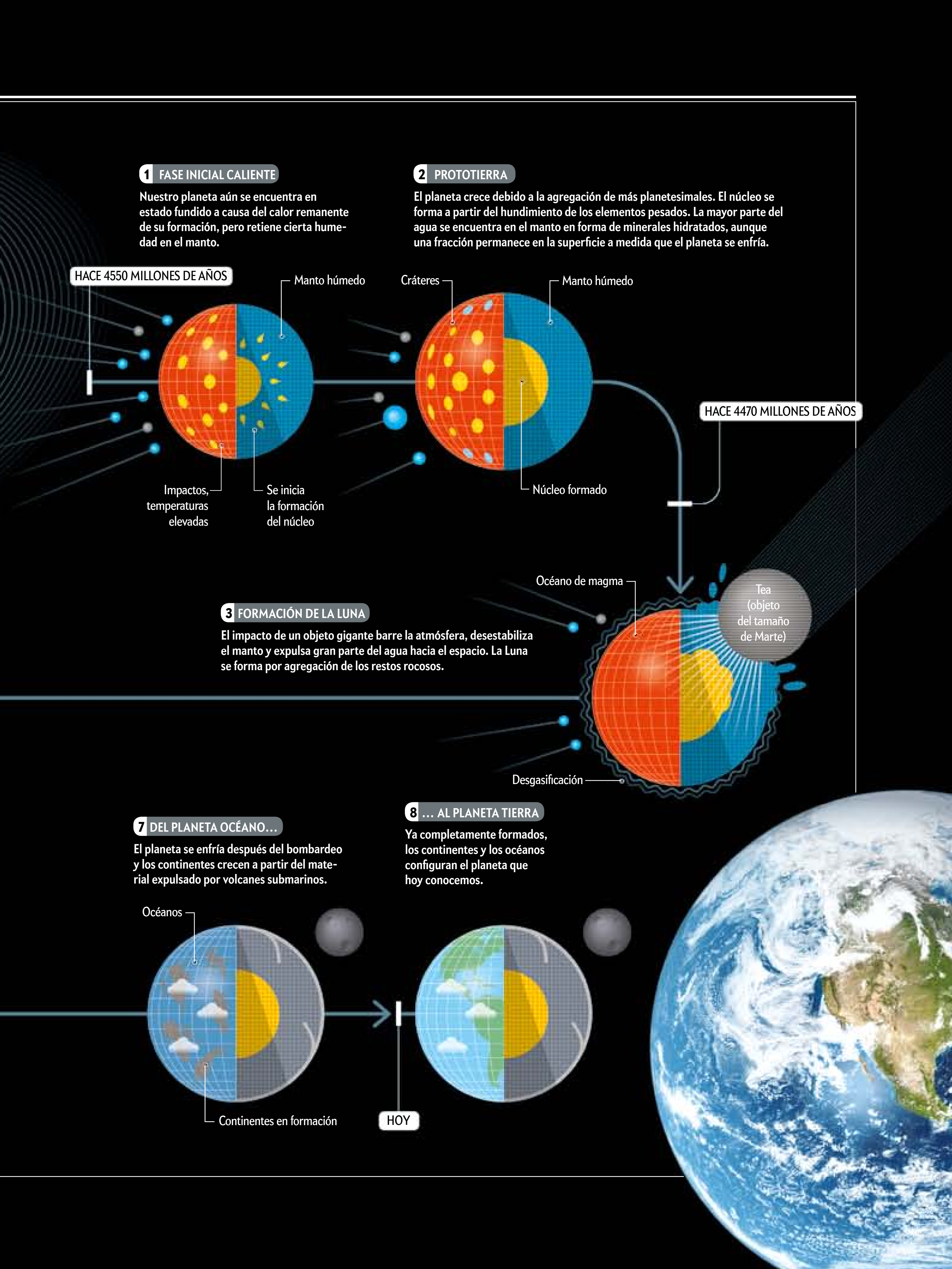
Asteroides y cometas

Océanos

Nubes

Protocontinentes

HACE 3900 MILLONES DE AÑOS


1 FASE INICIAL CALIENTE
Nuestro planeta aún se encuentra en estado fundido a causa del calor remanente de su formación, pero retiene cierta humedad en el manto.
HACE 4550 MILLONES DE AÑOS
Manto húmedo
Impactos, temperaturas elevadas
Se inicia la formación del núcleo
2 PROTOTIERRA
El planeta crece debido a la agregación de más planetesimales. El núcleo se forma a partir del hundimiento de los elementos pesados. La mayor parte del agua se encuentra en el manto en forma de minerales hidratados, aunque una fracción permanece en la superficie a medida que el planeta se enfría.
Cráteres
Manto húmedo
Núcleo formado
HACE 4470 MILLONES DE AÑOS
3 FORMACIÓN DE LA LUNA
El impacto de un objeto gigante barre la atmósfera, desestabiliza el manto y expulsa gran parte del agua hacia el espacio. La Luna se forma por agregación de los restos rocosos.
Océano de magma
Tea (objeto del tamaño de Marte)
Desgasificación
7 DEL PLANETA OCÉANO…
El planeta se enfría después del bombardeo y los continentes crecen a partir del material expulsado por volcanes submarinos.
Océanos
Continentes en formación
8 … AL PLANETA TIERRA
Ya completamente formados, los continentes y los océanos configuran el planeta que hoy conocemos.
HOY

Viene de la página 57
de los cuerpos procedentes de las regiones donde abundan los cometas, indica que, aunque el impacto ocasional de cometas pueda haber aportado cierta cantidad de agua a nuestro planeta, este mecanismo no constituiría la fuente dominante.

La alternativa más obvia la hallamos en los asteroides, considerados, hoy por hoy, los favoritos para explicar la mayor parte del agua terrestre. Al igual que los cometas, estos objetos constituyen fragmentos de pequeños planetesimales. El cinturón principal de asteroides, situado entre las órbitas de Marte y Júpiter, se halla mucho más cerca de nuestro planeta que el cinturón de Kuiper, por lo que estos astros cuentan con muchas más posibilidades de llegar a la Tierra. Para obtener pruebas de ello no hace falta ir más allá de la Luna: nuestro satélite natural se encuentra salpicado de cráteres debidos a antiguos impactos de asteroides. Los meteoritos (fragmentos de asteroides que han alcanzado la superficie terrestre) se exhiben hoy en los museos de ciencias naturales como testigos palpables de que la Tierra sigue expuesta al continuo bombardeo de derrubios interplanetarios. Su análisis permite desentrañar su historia y determinar si pudieron originar o no el océano terrestre. En particular, el estudio de determinadas familias de meteoritos ha revelado una proporción D/H en línea con la del agua marina.

Al decidir si los océanos terrestres deben su origen a los asteroides o a los cometas, no parece haber soluciones fáciles. Tal vez la dificultad no resida en la naturaleza, sino en las preguntas que planteamos

Al igual que los asteroides de los que proceden, los meteoritos muestran todo un abanico de composiciones y contenido de agua. Los asteroides situados en el margen interno del cinturón principal, a unas dos unidades astronómicas del Sol, son el origen de buena parte de los meteoritos pobres en agua hallados en la Tierra. En cambio, los de las regiones más externas, más cercanos a la órbita de Júpiter que al Sol, presentan cierto grado de humedad. Tienden a producir un tipo de meteoritos denominados condritas carbonáceas, agregados de carbonatos y minerales hidratados cuyo contenido en agua asciende a varios puntos porcentuales de su masa. La historia del agua en estas rocas ha sido investigada por uno de los autores del presente artículo (Young) en un trabajo que remite a los procesos de filtración del agua en las rocas terrestres. Los minerales hidratados de las condritas carbonáceas crecieron como resultado de una serie de reacciones entre la roca y el agua —tanto en estado líquido como gaseoso— y a temperaturas relativamente bajas, de unos pocos cientos de grados Celsius. En la Tierra, algunos minerales similares se originan cuando el agua percola a través una roca porosa. En los meteoritos, dan testimonio de una época en que el hielo se fundió y el agua se filtró a través de la matriz rocosa del asteroide.

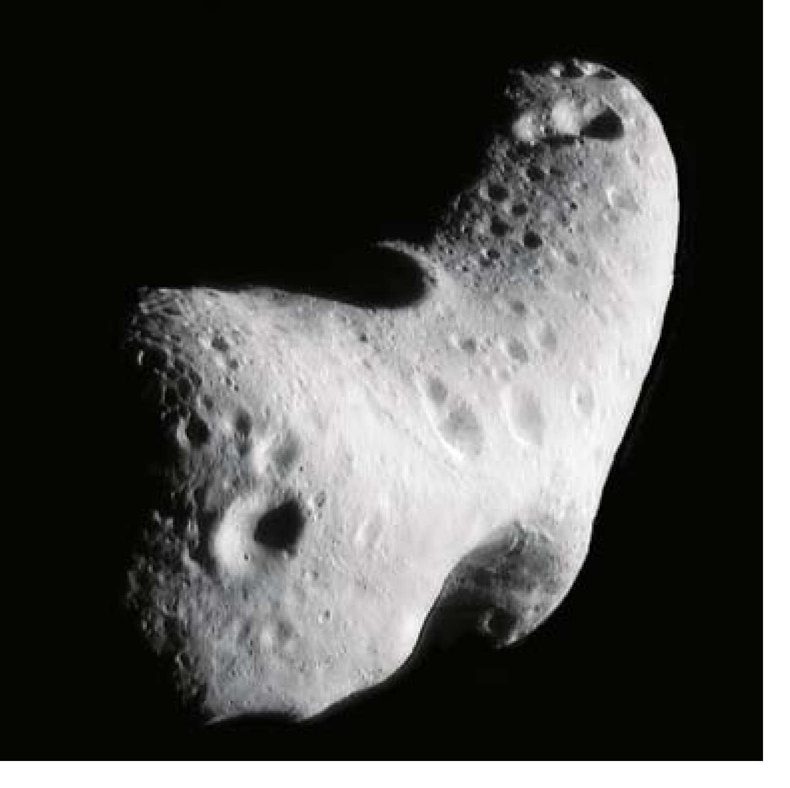
Casi con total certeza, la fuente de calor que fundió el hielo de los asteroides fue el isótopo del aluminio ^{26}Al, abundante en el sistema solar primigenio. En su proceso de desintegración para convertirse en ^{26}Mg, una muestra de ^{26}Al puede emitir energía durante millones de años. En las frías regiones externas del sistema solar primitivo, más allá de la línea de nieve, la desintegración del ^{26}Al hubo de constituir una fugaz pero intensa fuente energética que condicionó las características geológicas e hídricas de los asteroides ricos en compuestos volátiles. Durante unos pocos millones de años tras la formación del Sol, el agua contenida en muchos de ellos se habría encontrado en estado líquido, lo que probablemente mantuvo sistemas de circulación parecidos a los respiraderos hidrotermales de las actuales dorsales oceánicas terrestres. Los minerales hidratados y los carbonatos se habrían formado a medida que las salmueras calientes se filtraban por las fisuras de los asteroides, calentados desde el interior por los isótopos radiactivos. En las últimas fases del proceso de formación planetaria, la influencia gravitatoria de los planetas gigantes dispersó ese material por el joven sistema solar y lanzó a sus regiones internas asteroides ricos en agua, los cuales colisionaron contra la Tierra y otros planetas rocosos.

Podemos hallar pruebas de ese proceso de redistribución de material tanto en la composición química de nuestro planeta como en la de Marte. Un ejemplo nos lo proporcionan los elementos del grupo del platino, los cuales son de carácter siderófilo; es decir, presentan una mayor afinidad por el hierro y otros metales que por la roca. En la Tierra fundida recién formada, dichos elementos tendrían que haberse hundido junto con las masas de hierro y níquel que originaron el núcleo del planeta. Sin embargo, su concentración en el manto e incluso en la corteza terrestre alcanza hoy valores sorprendentemente elevados. Esa abundancia de elementos siderófilos implica que, desde el momento en que el planeta se enfrió lo suficiente para permitir la formación del núcleo, la aportación de material condrítico habría supuesto en torno al uno por ciento de la masa del planeta. Este «recubrimiento tardío» de rocas procedentes de impactos explica por qué hoy disponemos de platino suficiente para forjar anillos de boda o para fabricar conversores catalíticos para automóviles. Y, al mismo tiempo, explicaría también el origen del agua de nuestros océanos. Con toda probabilidad, todos los cuerpos rocosos del sistema solar interior —no solo la Tierra y Marte— fueron rociados con material procedente del cinturón de asteroides durante las fases tardías del proceso de formación planetaria.

Sin embargo, la idea de que la mayor parte del agua llegó a nuestro planeta a bordo de asteroides presenta un punto débil. Este se hace evidente al estudiar la abundancia de gases nobles, elementos como el xenón y el argón, caracterizados por una espectacular inactividad química. El hecho de que apenas reaccionen con otros elementos permite emplearlos como marcadores de todo tipo de procesos físicos, pues permanecen ajenos a las complicaciones de la química. Si la historia de los planetas rocosos se hallase tan íntimamente relacionada con los asteroides, unos y otros deberían contener proporciones muy similares de gases nobles. No obstante, tanto Marte como la Tierra presentan una abundancia de xenón y de argón considerablemente menor que la observada en los meteoritos.

En los últimos años se han propuesto varias soluciones a este «problema del xenón perdido». Algunas de ellas parecen volver a inclinar la balanza del lado de los cometas como principales portadores del agua y otras sustancias volátiles. En el momento de escribir el presente artículo, los expertos esperan con gran impaciencia los resultados de la misión Rosetta, que llevará a cabo el primer análisis de la abundancia de gases nobles en un

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE JOHN GRIMWADE; VISIBLE EARTH Y NASA (*Tierra*)





MANANTIALES PRIMIGENIOS: **Las mediciones efectuadas por la sonda *Rosetta* en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (*arriba*) sugieren que al menos una parte del agua terrestre procedería de asteroides, como Eros (*izquierda*).**

CORTESÍA DE LA ESA, MISIÓN ROSETTA Y NAVCAM (*cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko*); CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO Y UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS (*Eros*)

cometa. Sus mediciones tal vez aclaren el origen del agua en la Tierra. Aunque, si hemos de juzgar por experiencias pasadas, es posible que surtan el efecto contrario y que planteen nuevos interrogantes.

¿FALSA DISYUNTIVA?

A la hora de decidir si los océanos terrestres deben su origen a los asteroides o a los cometas, no parece haber soluciones fáciles. Tal vez la dificultad no resida en la naturaleza, sino en las preguntas que planteamos. Puede que la disyuntiva entre asteroides y cometas no sea tal. Hace poco, uno de nosotros (Jewitt), junto con Henry Hsieh, del Instituto de Astronomía y Astrofísica de la Academia Sínica de Taiwán, descubrió que el cinturón principal de asteroides también alberga cometas; es decir, cuerpos que eyectan polvo de forma periódica. Sorprendentemente, dichos objetos contienen hielo a pesar de orbitar dentro de la línea de nieve. Por otro lado, tal y como señalábamos al principio, la verdadera pregunta no es por qué la Tierra tiene tanta agua, sino tan poca. Nuestro planeta pudo haber adquirido su fino recubrimiento acuoso por medio de múltiples formas, cada una de las cuales depende de la historia exacta de la Tierra, de los objetos que colisionaron contra ella y de sus condiciones iniciales de formación. Todas estas ambigüedades dejan un amplio margen para explicaciones alternativas que, aunque parezcan improbables, no pueden descartarse por completo.

Por ejemplo, la mayor parte del agua pudo haber estado presente en nuestro planeta casi desde el principio. Algunas investigaciones recientes sugieren que los iones de hidrógeno procedentes del viento solar pudieron acumularse en los bordes amorfos de las partículas de polvo interplanetario y engendrar en ellas minerales hidratados. Después, esas partículas habrían transportado el material húmedo hasta los planetas y los planetesimales durante las etapas tempranas de su formación. Sin embargo, resulta difícil imaginar cómo esas reservas de agua pudieron persistir en las profundidades del manto y ascender solo más tarde, tras los grandes impactos que erosionaron la superficie y marcaron el final del proceso de gestación planetaria.

En fecha reciente han comenzado a suscitar interés algunos cuerpos más voluminosos que los cometas y los asteroides. Pensemos en el planeta enano Ceres, que, con un diámetro de 900 kilómetros, constituye el mayor asteroide del sistema solar. Se calcula que el agua podría dar cuenta de la mitad de su masa. A comienzos de 2014, se observaron en él lo que parecían ser emanaciones de vapor, con una tasa de emisión de unas 20 toneladas por hora: un claro indicio de su elevado contenido en agua. La masa de la Tierra es unas 6000 veces superior a la de Ceres. Por tanto, si realmente la mitad del planeta enano fuese agua, bastarían unos cinco cuerpos como él para dar cuenta de toda el agua terrestre, tanto subterránea como superficial.

Los objetos de tales características eran muchísimo más comunes en el caótico sistema solar primitivo que en el actual, por lo que no resulta difícil imaginar que algunos se abriesen camino hasta nuestro planeta e impactasen contra él. Habría bastado un puñado de ellos para originar los océanos terrestres sin necesidad de un bombardeo adicional de pequeños asteroides o cometas. La sonda *Dawn*, de la NASA, llegó a Ceres el pasado mes de marzo. El encuentro permitirá efectuar observaciones más detalladas sobre el hielo y la desgasificación del planeta enano. Y, sin lugar a dudas, también aportará nuevos y sorprendentes datos sobre la historia del agua, tanto en nuestro planeta como fuera de él.

PARA SABER MÁS

A population of comets in the main asteroid belt. Henry H. Hsieh y David Jewitt en *Science*, vol. 312, págs. 561-563, marzo de 2006.

Water and astrobiology. Michael J. Mottl et al. en *Chemie der Erde-Geochemistry*, vol. 67, n.º 4, págs. 253-282, diciembre de 2007.

Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals. John P. Bardley et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111, n.º 5, págs. 1732-1735, febrero de 2014.

67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. K. Altwegg et al. en *Science*, vol. 347, art. n.º 1261952, enero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Meteoritos primitivos. Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.

El sistema solar más allá de Neptuno. Michael D. Lemonick en *IyC*, enero de 2015.



FÍSICA CUÁNTICA

MUNDOS CUÁNT

Numerosos sistemas cuánticos resultan demasiado complejos para calcular sus propiedades. La simulación cuántica permite recrear su comportamiento por medio de sistemas formalmente análogos y fáciles de controlar en el laboratorio

Oliver Morsch e Immanuel Bloch

ICOS SIMULADOS



TEATRO CUÁNTICO: En este simulador cuántico del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, un sinnúmero de espejos, lentes y fibras ópticas controla la luz de docenas de láseres. Con él los investigadores pueden enfriar átomos, atraparlos y manipularlos a fin de imitar efectos imposibles de estudiar por otros medios.



Oliver Morsch desarrolla su investigación sobre átomos en redes ópticas en la Universidad de Pisa.

Immanuel Bloch es director científico en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, donde lidera el grupo de investigación de sistemas cuánticos de muchos cuerpos.

Hacia finales del siglo xix, la construcción de las primeras redes eléctricas de gran tamaño supuso un verdadero problema para ingenieros e inversores. Nadie era capaz de predecir el comportamiento de aquellos sistemas, que por vez primera surcaban cientos de kilómetros para transportar corriente alterna hasta los rincones más remotos de América y Europa. Las sobretensiones debidas a cortocircuitos u otras adversidades amenazaban con destruir cables e incluso instalaciones industriales enteras. Y aunque en principio el comportamiento de una red eléctrica podía describirse por medios matemáticos, las complejas ecuaciones diferenciales resultantes eran en la práctica imposibles de resolver a mano. Ello aumentaba sobremanera los riesgos técnicos y económicos asociados a los grandes proyectos eléctricos.

Azuzados por la necesidad, los ingenieros dieron con una brillante idea: si no eran capaces de calcular el comportamiento de una red eléctrica, tal vez pudieran simularlo. Ello implicaba fabricar sistemas reducidos y manejables en un laboratorio, que, combinados, presentasen propiedades análogas a las de una línea de transmisión de cientos de kilómetros de longitud. Un simulador de tales características fue construido hacia 1930 por Vannevar Bush, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Bautizado como «analizador diferencial», su dispositivo permitía reproducir en el laboratorio el comportamiento de una red eléctrica y, con ello, resolver las ecuaciones que la describían. De hecho, tales analizadores no eran ni más ni menos que computadoras, solo que analógicas en vez de digitales.

Hasta principios de los años sesenta, numerosas compañías eléctricas recurrieron a los analizadores de redes. Pero, poco después, estos comenzaron a verse reemplazados por ordenadores digitales, los cuales podían obtener los mismos resultados mejor y más rápido. Con ello, la era de las computadoras analógicas parecía haber llegado a su fin.

EL RENACER DE UNA TÉCNICA

Desde hace unos años, sin embargo, los simuladores han experimentado un regreso inesperado bajo una nueva forma. A pesar de la enorme potencia de cálculo de los ordenadores digitales modernos, existen aún problemas que estos no pueden resolver. El más fundamental de ellos fue formulado por Richard Feynman durante una charla impartida en 1981. Dicho problema nos lleva a una pregunta tan simple como profunda: ¿cómo se simula la realidad de la física? En particular, ¿cómo se simula la realidad de la física cuántica?

La trascendencia de la cuestión puede verse como consecuencia de uno de los fenómenos centrales del mundo cuántico: la superposición de estados. Para ver por qué, imaginemos una pequeña aguja imantada que puede adoptar una de dos posiciones: o bien su polo norte apunta hacia arriba, o bien hacia abajo. Un disco duro consta, en esencia, de una cantidad enorme de tales agujas. Para describir su estado, necesitaremos tantos bits (variables que pueden tomar los valores 0 o 1, «arriba» o «abajo») como agujas. Si añadimos una aguja más, habremos de incorporar un bit adicional.

Existe un análogo cuántico de nuestra aguja imantada: el espín del electrón. Sin embargo, la descripción física de un conjunto de espines difiere de manera radical de la de su versión clásica. Además de hacia arriba o hacia abajo, las leyes cuánticas permiten que el espín de una partícula se encuentre en una superposición de ambos estados. Así pues, para caracterizar el espín de un electrón hacen falta dos números, llamados amplitudes de probabilidad. Su cuadrado determina la probabilidad de que, al efectuar una medida, hallemos el espín en un estado u otro. Pero, mientras no realicemos ninguna medición —y en ello radica la peculiaridad de la mecánica cuántica—, el espín del electrón apuntará en ambas direcciones a la vez.

La situación se complica cuando consideramos simultáneamente varios espines, ya que el principio de superposición debe aplicarse a todos ellos. Para describir su estado con exactitud, habremos de conocer las amplitudes de probabilidad de todas las combinaciones posibles de dos estados. Así pues, en el caso de dos espines, necesitaremos cuatro números (2^2), y con tres espines, ocho (2^3). En general, dar cuenta de un sistema de N espines requiere 2^N valores, una cantidad que crece de forma exponencial. Para describir el estado de 40 espines harían falta en torno a un billón de números, una cantidad de información equivalente a varios teraoctetos de datos. Pero, para el caso de 80 espines, necesitaríamos billones de teraoctetos: más información que la acumulada por la humanidad a lo largo de toda su historia.

Nuestro ejemplo revela hasta qué punto resulta imposible calcular el comportamiento de un sistema cuántico —incluso uno de tamaño modesto— con un ordenador digital. Feynman lo expresó así: «La naturaleza no es clásica. Y, si deseamos simularla, habremos de asegurarnos de que la simulación es cuántica». Para ello contamos en principio con dos posibilidades: o bien construir un ordenador digital, pero en el que las unidades básicas de información sean cuánticas (bits cuánticos, o «qubits»), o bien desarrollar dispositivos analógicos, similares en espíritu a los antiguos analizadores de redes. Es decir, simuladores cuánticos.

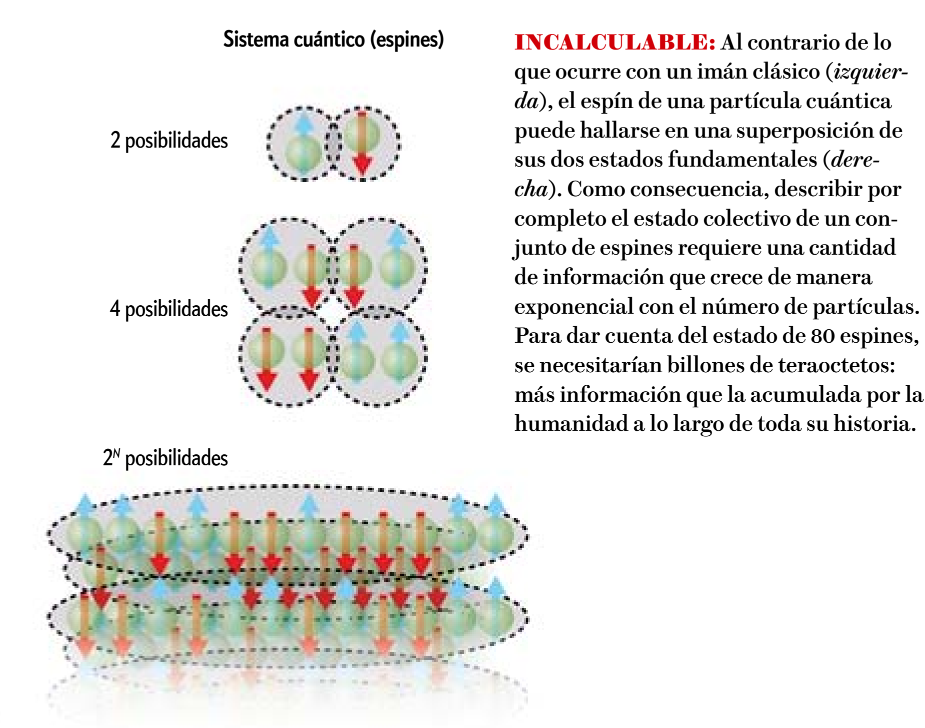
EN SÍNTESIS

Describir el estado de un sistema cuántico de muchos cuerpos, como un sólido, requiere manejar ingentes cantidades de información. Calcular sus propiedades resulta impracticable incluso con los mejores superordenadores del mundo.

Una manera alternativa de estudiar tales sistemas consiste en simular su comportamiento por medio de un número reducido de objetos cuánticos controlables, como átomos ultrafríos atrapados en redes ópticas.

Gracias a las técnicas de simulación cuántica, los físicos pueden estudiar en condiciones controladas todo tipo de fenómenos, como las transiciones de fase cuánticas o las propiedades electrónicas de materiales exóticos.

PÁGINAS ANTERIORES: AXEL GRIESCH



INCALCULABLE: Al contrario de lo que ocurre con un imán clásico (*izquierda*), el espín de una partícula cuántica puede hallarse en una superposición de sus dos estados fundamentales (*derecha*). Como consecuencia, describir por completo el estado colectivo de un conjunto de espines requiere una cantidad de información que crece de manera exponencial con el número de partículas. Para dar cuenta del estado de 80 espines, se necesitarían billones de teraoctetos: más información que la acumulada por la humanidad a lo largo de toda su historia.

MIKE BECKERS/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

Para construir un simulador de tales características se necesitan objetos cuánticos cuyas propiedades sean bien conocidas por los investigadores y que puedan controlarse con facilidad en un laboratorio. Durante los últimos años se han investigado varios sistemas de este tipo, como iones atrapados en campos eléctricos, fotones o dispositivos superconductores. Cada uno de estos enfoques presenta sus ventajas y sus inconvenientes. Los iones se dejan apresar y controlar sin problemas, pero, dado que poseen carga eléctrica, se hallan sujetos a las perturbaciones electromagnéticas. Además, no resulta sencillo trabajar de forma simultánea con más de una docena de ellos. Los componentes superconductores pueden fabricarse a medida según las necesidades de los investigadores, pero también en este caso se hace difícil combinar un gran número de ellos en un mismo sistema.

Una posibilidad más prometedora consiste en enfriar átomos neutros a temperaturas muy bajas y atraparlos después en una «red óptica» formada por haces de luz láser. Por un lado, los átomos neutros permanecen relativamente inmunes a las perturbaciones electromagnéticas; por otro, los investigadores pueden atrapar con facilidad millones de ellos y manipularlos prácticamente a su antojo. Así pues, estos sistemas ofrecen propiedades óptimas para construir simuladores cuánticos.

TRANSICIONES CUÁNTICAS

Son varios los escenarios que pueden recrearse con ayuda de átomos neutros en redes ópticas. Un sólido consta de un enorme número de partículas, lo que dificulta predecir el comportamiento de metales, semiconductores o superconductores a partir de las propiedades de los átomos que los componen. Hoy por hoy, aún no existe una teoría que explique por completo por qué algunos materiales se tornan superconductores a temperaturas inesperadamente elevadas. Los simuladores cuánticos podrían ayudar a entender tales fenómenos y, tal vez, incluso a desarrollar nuevos materiales con propiedades diseñadas a medida.

En 2002, un grupo de investigadores de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich construyó un simulador cuántico sencillo, gracias al cual logró reproducir un fenómeno que los físicos de estado sólido habían predicho veinte años atrás. Este versaba sobre el comportamiento de partículas cuánticas sometidas a un potencial periódico (como el creado por una red cristalina) y que, además, se repelen cuando se encuentran. Las leyes cuánticas tienden a facilitar el movimiento de tales partículas, ya que, gracias al efecto túnel, existe una probabilidad de que una partícula que se halla en un pozo de potencial traspase al pozo vecino incluso si carece de la energía necesaria para superar la barrera. A partir de consideraciones teóricas, los investigadores sabían que, a temperaturas muy bajas, cuando la fuerza de repulsión entre las partículas y la profundidad de los pozos satisficiesen una proporción determinada, debía producirse una transición de fase cuántica; es decir, una metamorfosis entre dos estados fundamentalmente distintos, como ocurre cuando el agua líquida se calienta, hierve y se transforma en vapor.

En el caso de partículas cuánticas en un retículo cristalino, la causa de la transición de fase es otra, ya que cerca del cero absoluto toda agitación térmica se interrumpe y lo único que puede desencadenar tales procesos es una especie de «ruido cuántico». Con todo, hay una explicación muy gráfica de lo que sucede. Cuando las fuerzas que reinan en el seno del cristal revisten poca intensidad, las partículas gozan de cierta libertad de movimiento, ya que pueden pasar por efecto túnel de un pozo de potencial a otro. Podemos decir que conforman un estado «superfluido», en el que la interacción entre dos partículas que coinciden en un mismo sitio apenas desempeña ningún papel. En cambio, si los pozos de potencial son profundos, las partículas se mantendrán relativamente fijas en sus posiciones. Debido a su repulsión mutua, que una de ellas pase a una posición de la red ya ocupada por otra partícula resultará muy desfavorable energéticamente. Ello provocará que las partículas dejen de circular por la red; un fenómeno que da lugar a un estado conocido como «aislante de Mott» [*véase* «¿Aislante o metal?», por Arantzazu Mascaraque y Antonio Tejeda; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

Aunque en un sólido nadie había conseguido observar de manera directa la transición a aislante de Mott, para el equipo

de Múnich fue relativamente sencillo hacerlo en un simulador cuántico. Para ello partieron de un condensado de Bose-Einstein, una fase exótica de la materia en la que un gran número de partículas enfriadas a temperaturas muy bajas adoptan el mismo estado cuántico. Al atrapar dicho condensado en una red óptica tridimensional, generaron un sistema análogo a un sólido. A continuación, ajustaron los láseres que conformaban la red para que los pozos de potencial fuesen poco profundos y los átomos pudieran moverse con facilidad de uno a otro.

Para comprobarlo, los físicos dejaron caer los átomos de la red apagando los láseres. Dado que toda partícula tiene asociada una onda de materia, cuando estas se superponen generan un patrón de interferencia característico. Al detectarlo, los investigadores dedujeron que los átomos se encontraban en un estado análogo al superfluido. Después, al repetir el experimento aumentando poco a poco la profundidad de los pozos de potencial, observaron que, en cierto momento, el patrón de interferencia desaparecía: un signo de que los átomos ya no vagaban con libertad, sino que permanecían atrapados en posiciones fijas en la red. El superfluido había dado paso a un aislante de Mott.

PARTÍCULAS INDIVIDUALES

A la hora de estudiar un sólido, los investigadores han de recurrir a vías indirectas, como aplicar una diferencia de potencial y medir la corriente que fluye, o exponer el material a campos eléctricos o magnéticos. Sin embargo, resulta imposible observar de manera directa el movimiento de cada uno de los electrones del material.

La situación cambia cuando simulamos un sistema por medio de redes ópticas. Hacer visible cada uno de los átomos que toman parte en la simulación no resulta tarea sencilla, ya que la distancia entre los pozos de la red se corresponde aproximadamente con la longitud de onda de la luz, la cual limita a su vez la resolución de cualquier microscopio. A pesar de todo, tal objetivo fue logrado por investigadores de Harvard y del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching. Para ello, acoplaron con habilidad un microscopio de alta resolución a las instalaciones de vacío y los láseres necesarios para los experimentos con átomos fríos. La recompensa fue una mirada excepcional a la vida interior de un sistema cuántico de muchos cuerpos. Los físicos lograron hacer visibles cada uno de los átomos y comprobaron que, en efecto, en un aislante de Mott cada sitio de la red se encuentra ocupado por una sola partícula.

La posibilidad de observar átomos individuales ha abierto perspectivas completamente nuevas. Gracias a esta técnica, el grupo de Harvard consiguió reproducir la creación de un imán cuántico; un proceso que, al igual que ocurre con la formación de un aislante de Mott, también ocurre por medio de una transición de fase. Pensemos en una cadena formada por pequeños imanes. A partir de consideraciones clásicas, resulta sencillo ver que cada imán tenderá a orientarse en el mismo sentido que su vecino. Si agitamos la configuración, llegará un momento en que esa alineación se perderá. Tendrá lugar entonces una transición de fase de un estado magnetizado a uno carente de magnetización.

Algo parecido ocurre con un conjunto de imanes cuánticos. Para comprobarlo, los investigadores simularon una cadena de espines por medio de átomos atrapados en una red óptica. Dichos átomos no eran magnéticos, por lo que, como cualidad análoga a la orientación de los espines, fue necesario emplear otra propiedad característica del sistema. Gracias a un ingenioso montaje experimental, los físicos pudieron usar como equivalente el número de partículas situadas en cada sitio de la red: cuando cada nodo se encontraba ocupado exactamente por un átomo, el sistema podía reinterpretarse como una cadena de espines apuntando hacia arriba.

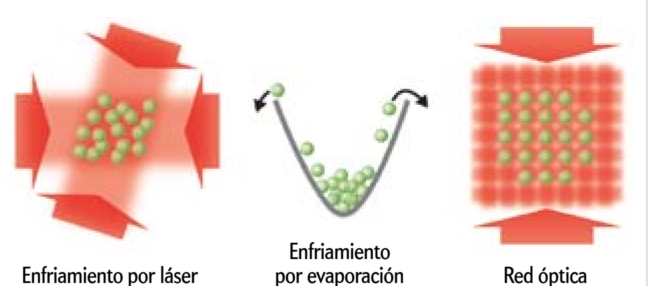
Para simular la transición de fase magnética, los físicos emplearon un campo externo cuyo efecto equivalía a «inclinar» la red. Cuando el campo alcanzaba una intensidad determinada,

ÁTOMOS EN REDES ÓPTICAS

Congelados y atrapados

Numerosas simulaciones cuánticas consisten en manipular átomos en redes ópticas. Para ello, los átomos deben primero enfriarse a temperaturas muy próximas al cero absoluto. El enfriamiento por láser (*izquierda*) se basa en el retroceso que experimenta un átomo (*verde*) cuando absorbe un fotón. La longitud de onda del láser se aumenta ligeramente con respecto a la que corresponde a la frecuencia de resonancia del átomo (aquella para la que la absorción es máxima). Debido al efecto Doppler, un átomo que se mueva hacia el láser «verá» una frecuencia más próxima a la de resonancia, por lo que absorberá más fotones que otros que ya estén en reposo. Si los haces láser provienen de las tres direcciones del espacio, los átomos irán perdiendo poco a poco su energía cinética. Esta técnica permite enfriar las partículas hasta pocas millonésimas de grado Kelvin.

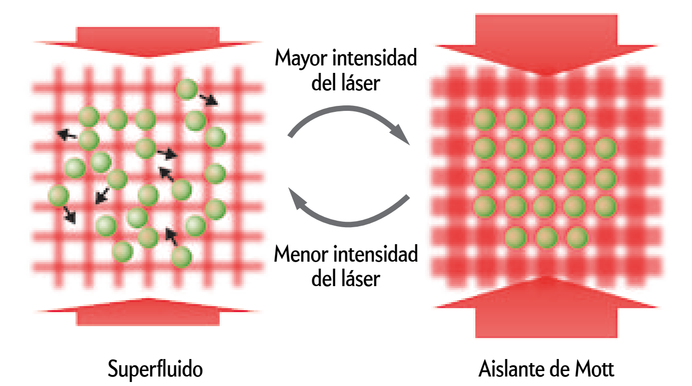
Con trampas magnéticas u ópticas (*centro*) pueden lograrse temperaturas aún menores. Para ello se emplea el «enfriamiento por evaporación», una técnica que imita el proceso que tiene lugar cuando soplamos para enfriar una bebida. Dichas trampas generan un pozo de potencial, de modo que los átomos más energéticos escapan de él y los que permanecen en su interior alcanzan un estado de equilibrio térmico a temperaturas ultrabajas.



Una vez enfriados, los átomos se atrapan en una red óptica formada por láseres (*derecha*). Esta se basa en la fuerza dipolar que la propia luz láser ejerce sobre el átomo, la cual lo atrae hacia el punto de mayor intensidad luminosa. Para generar una red, los investigadores superponen varios haces láser, lo que genera franjas de interferencia en las que se alternan zonas de mayor y menor intensidad luminosa. Este método permite crear un entramado de pozos de potencial distribuidos prácticamente a voluntad, en cada uno de los cuales puede quedar retenido un único átomo.

MIKE BECKERS/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

la diferencia de altura entre dos posiciones vecinas correspondía a la barrera energética resultante de la repulsión entre átomos. De esta manera, algunos de ellos podían pasar por efecto túnel a sitios ya ocupados, dejando tras de sí una posición libre. Como resultado, el experimento consiguió recrear las condiciones de un estado antiferromagnético, en el que espines vecinos apuntan en sentidos opuestos. Y, a medida que inclinaban la red, los investigadores pudieron observar la transición de fase al estado antiferromagnético.



TRANSICIÓN CONTROLADA: Los átomos atrapados en redes ópticas permiten simular las fases cuánticas de la materia. Cuando la intensidad de los láseres es débil (*izquierda*), los átomos pueden moverse con libertad, lo que reproduce las condiciones de un superfluido. Al aumentar su potencia, los pozos de potencial se vuelven más profundos y las partículas quedan paralizadas; una fase conocida como aislante de Mott.

DEL GRAFENO A LOS ESTADOS DE HIGGS

Los simuladores cuánticos están permitiendo estudiar fenómenos cada vez más complejos. En la actualidad resulta posible incluso alterar la geometría de la red a voluntad. En 2011, un grupo de investigadores del Instituto Politécnico de Zúrich (ETH) consiguió recrear una red hexagonal. Gracias a ello pudieron simular el comportamiento electrónico del grafeno, un material muy estudiado por su potencial para revolucionar la industria de los componentes electrónicos.

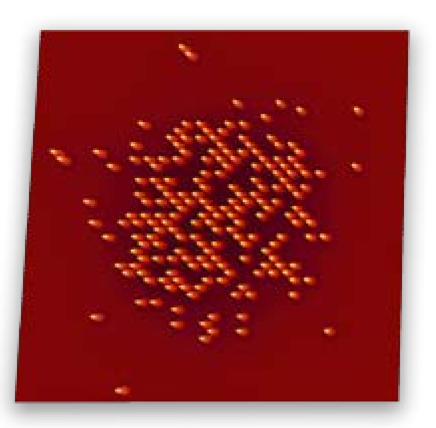
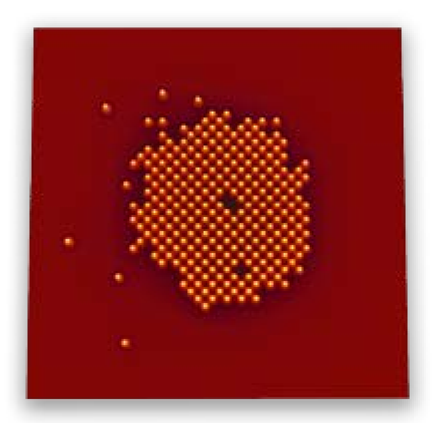
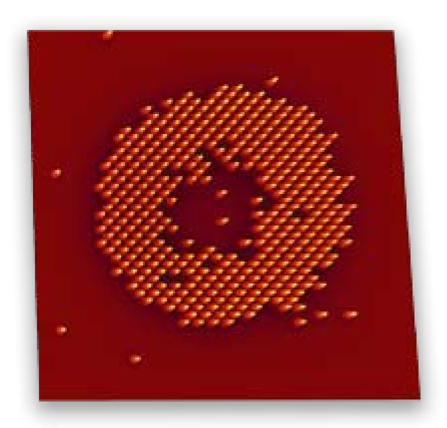
El grafeno consta de capas bidimensionales (de un único átomo de espesor) de átomos de carbono dispuestos en forma de panal. Dicha estructura es la responsable de las excepcionales propiedades de este material en lo que respecta a su conductividad térmica y eléctrica. Entre otras razones, ello se debe a la peculiar estructura de sus niveles de energía. En los materiales comunes, los niveles de energía que pueden ocupar los electrones forman bandas separadas. En el grafeno, en cambio, dichas bandas se tocan en ciertos puntos, llamados «puntos de Dirac». Ello modifica de manera radical las propiedades electrónicas del material, ya que los electrones se comportan de modo análogo a las partículas relativistas que se desplazan a velocidades próximas a la de la luz (si bien su velocidad real es mucho menor) [*véase* «Grafeno», por A. K. Geim y P. Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008, y «Electrónica del grafeno», por J. González Carmona, F. Guinea y M. A. H. Vozmediano; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010].

Los investigadores del ETH emplearon una red hexagonal de rayos láser para atrapar átomos de potasio, los cuales pasaron a comportarse como los electrones en el grafeno. De esta manera, bajo condiciones controlables, estudiaron procesos que hubieran sido imposibles de analizar en una muestra de grafeno real. Entre ellos, modificar la forma de la red, desplazar los puntos de Dirac y fusionarlos entre sí.

Hoy resulta posible incluso recrear campos magnéticos artificiales en redes ópticas, un requisito imprescindible para simular ciertas situaciones en las que intervienen partículas dotadas de carga eléctrica. Cuando estas se hallan inmersas en un campo magnético, actúa sobre ellas una fuerza perpendicular a la dirección de su movimiento. La situación se torna especialmente interesante cuando las partículas se ven obligadas a desplazarse en dos dimensiones; es decir, sobre una superficie. Uno de los fenómenos de este tipo más estudiados es el efecto Hall cuántico, cuyo descubrimiento valió a su autor el premio Nobel de física en 1985. Dicho efecto tiene lugar cuando un sistema bidimensional de electrones se somete a un campo magnético externo muy intenso.

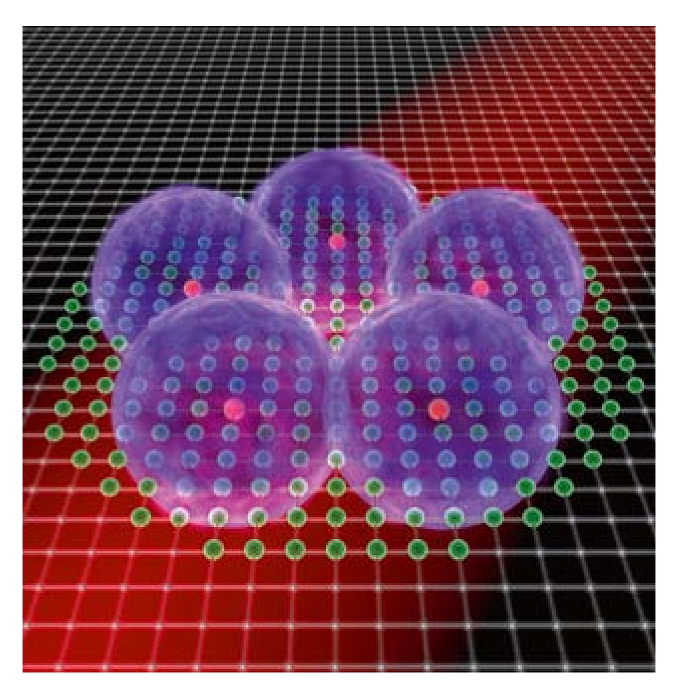
En simulaciones cuánticas con átomos fríos, resulta sencillo generar estructuras bidimensionales. Y cabe pensar que, en un futuro, será posible generar campos magnéticos artificiales lo bastante intensos para estudiar en detalle el comportamiento de los electrones en tales condiciones. En principio, tales campos magnéticos sintéticos podrían ser hasta miles de veces mayores que los que hoy consiguen generar los mejores imanes del mundo. Nadie sabe a ciencia cierta cuáles podrían ser sus efectos, por lo que los investigadores no descartan encontrar sorpresas.

Pero los electrones de un sólido no solo experimentan los efectos de los campos externos, sino también los que generan otras partículas en el seno del material. De hecho, algunas pro-

FASES BAJO EL MICROSCOPIO: Las técnicas de simulación cuántica permiten visualizar átomos individuales. Esta reconstrucción muestra las posiciones atómicas de un condensado desordenado (*izquierda*) y de su transición a aislante de Mott (*centro* y *derecha*).

MIKE BECKERS/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* (*arriba*); STEFAN KUHR E IMMANUEL BLOCH/INSTITUTO MAX PLANCK DE ÓPTICA CUÁNTICA (*abajo*)



INTERACCIONES SINTÉTICAS: A fin de recrear las interacciones a larga distancia que experimentan las partículas de un sólido, los átomos de una simulación pueden excitarse hasta alcanzar los estados de Rydberg, configuraciones en las que la nube electrónica se encuentra mucho más expandida de lo usual (*imagen*). Como consecuencia, los átomos se tornan sensibles a efectos generados en puntos distantes de la red.

piedades de gran interés de numerosos sistemas cuánticos se deben a las interacciones entre sus propios componentes, ya sean estas atractivas o repulsivas. Sin embargo, la mayoría de las simulaciones cuánticas realizadas hasta ahora solo han logrado recrear las interacciones «de contacto»; es decir, aquellas que aparecen cuando dos o más átomos coinciden en el mismo pozo de potencial.

Con ayuda de pulsos láser, una interacción a distancias mayores puede conseguirse excitando los átomos hasta los llamados «estados de Rydberg», aquellos en los que el electrón más externo se sitúa a una distancia del núcleo miles de veces superior a la normal, lo que aumenta sobremanera la sensibilidad del átomo a campos eléctricos externos. Si dos átomos excitados de esta manera se acercan, el movimiento de cada electrón crea en el otro un campo eléctrico de corta duración, lo que genera una fuerza de varios micrómetros de alcance y cuya intensidad puede regularse con precisión. Hoy en día ya resulta posible recrear estructuras cristalinas con átomos de Rydberg. En el futuro, los expertos confían en emplear esta técnica para simular sistemas de todo tipo, como algunos complejos moleculares importantes para la fotosíntesis.

Las posibilidades de los simuladores cuánticos no se acaban en el estudio de los sólidos. Los átomos atrapados en redes ópticas permiten reproducir fenómenos que normalmente asociamos a los grandes aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra. En 2012, un grupo de investigadores del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching logró identificar las llamadas «excitaciones de Higgs», estados colectivos que se comportan de manera análoga al célebre bosón de Higgs del modelo estándar de las partículas elementales, descubierto aquel mismo año en el LHC. De hecho, aunque el mecanismo de Higgs es hoy conocido en el ámbito de la física de partículas, sus orígenes se remontan a la física del estado sólido [*véase* «De la superconductividad al bosón de Higgs», por Miguel Ángel Vázquez-Mozo; Investigación y Ciencia, julio de 2014].

Los investigadores de Garching estudiaron con detalle el comportamiento de un gas frío durante la transición a aislante de Mott. En primer lugar, crearon un condensado de Bose-Einstein en una red bidimensional. A continuación variaron de forma periódica la intensidad de los láseres —y, con ello, la profundidad de la red— durante algunos milisegundos. Al medir con precisión los cambios de temperatura del gas inducidos por dicha perturbación, lograron determinar la manera en que reaccionaba el gas cuántico. En la proximidad de la transición de fase, el sistema resultó comportarse tal y como se esperaba que lo hiciera en presencia de una excitación de Higgs.

LA PROMESA DE FEYNMAN

Como hemos visto, la simulación cuántica permite reproducir en el laboratorio fenómenos propios de los más diversos campos de la física. Una posibilidad de particular interés reside en la modelización de materiales y sistemas completamente nuevos, carentes de análogo en la naturaleza. Tales experimentos podrían iluminar aplicaciones que, hoy por hoy, resultan inimaginables.

Algo muy parecido sucedió hace un siglo con los analizadores de redes. Pronto se descubrió que, además de predecir el comportamiento de las grandes redes de distribución eléctrica, dichos dispositivos ofrecían la posibilidad de afrontar cálculos muy diversos. Las ecuaciones diferenciales que, gracias a sus incontables componentes, los analizadores resolvían de forma analógica resultaron describir otros fenómenos físicos, como la deformación de algunos materiales o incluso ciertos procesos regidos por la ecuación de Schrödinger, una de las bases de la mecánica cuántica.

Sin duda, todos esperamos ver algún día el objetivo que adelantó Feynman en su charla: un ordenador cuántico universal que pueda programarse a voluntad y que permita calcular el comportamiento de cualquier sistema cuántico. Hace años que los investigadores se afanan por desarrollar uno. Por el momento, sin embargo, los mejores prototipos no logran combinar más que unos pocos qubits, por lo que aún no pueden aplicarse a ningún cálculo útil.

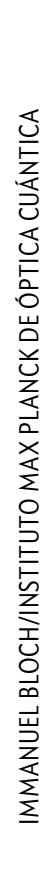
Mientras tanto, los simuladores cuánticos seguirán siendo indispensables para entender mejor todo tipo de procesos. Cabe augurar que aún disfrutaremos de su potencial durante años, en el ámbito de la física cuántica y más allá.

PARA SABER MÁS

Quantum simulations with ultracold quantum gases. Immanuel Bloch, Jean Dalibard y Sylvain Nascimbène en *Nature Physics*, vol. 8, págs. 267-276, abril de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Campos electromagnéticos artificiales. Karina Jiménez García en *IyC*, febrero de 2012.
Objetivos y oportunidades de la simulación cuántica. Juan Ignacio Cirac y Peter Zoller en *IyC*, noviembre de 2012.
Simulación cuántica de dimensiones suplementarias. José Ignacio Latorre en *IyC*, julio de 2013.





MEDICINA

COMBATIR EL DOLOR CRÓNICO

Nuevos hallazgos sobre las causas del dolor abren vías para el desarrollo de analgésicos más eficaces

Stephani Sutherland

EN SÍNTESIS

El dolor crónico afecta a más personas y conlleva un mayor coste que el cáncer, las enfermedades cardíacas y la diabetes juntos en los EE.UU.

Los opiáceos y otros fármacos actuales poseen escasa eficacia a la hora de combatir la mayor parte del dolor crónico y pueden presentar graves riesgos. El descubrimiento de vías moleculares específicas del dolor ha revelado nuevas dianas para el desarrollo de fármacos.

Entre las sustancias que están siendo ensayadas como analgésicos de nueva generación cabe mencionar las halladas en el veneno de algunos animales.

GERALD SLOTA

Stephani Sutherland es doctora en neurociencia y divulgadora científica.



«VE AL SUPERMERCADO; NO AL BURGER KING, PORQUE EL HIELO QUE VENDEN ALLÍ SE deshace muy rápido», instruía Jama Bond a su marido mientras este se apresuraba a comprar hielo una noche de 2012. Bond, que por entonces tenía 38 años y estaba embarazada de casi nueve meses, necesitaba bolsas de hielo para mantener fría el agua en el barreño donde sumergía los pies, que estaban rojos, hinchados y doloridos. Había aprendido a protegerlos con bolsas de basura de modo que el agua helada no dañara su piel. Unos meses antes, era una mujer sana, con un trabajo de oficina en una compañía de instalación de paneles solares, y llevaba una vida más o menos normal. Ahora apenas abandonaba el confort del baño de agua excepto para ducharse, algo que le suponía «una tortura».

Bond, que vive en Santa Rosa, California, sufría una enfermedad denominada eritromelalgia (del griego para «dolor de extremidad enrojecida») en la que se experimenta un ardor intenso en los pies o las manos, que se vuelven sumamente sensibles incluso a temperaturas no muy elevadas o ante la más ligera presión. Para la mayoría de los pacientes como Bond, el trastorno surge sin una causa aparente (no presenta una relación conocida con el embarazo). Aunque la eritromelalgia es una enfermedad rara que afecta solo a 13 de cada millón de habitantes, el dolor crónico en sus innumerables formas resulta extraordinariamente corriente y a menudo tiene un origen difícil de explicar.

Se estima que unos 100 millones de personas en EE.UU. luchan contra él, sobre todo contra el dolor de espalda, la cefalea o la artritis. El dolor crónico afecta a más personas que la diabetes, el cáncer y las cardiopatías juntos, y acarrea un coste también mayor: según un análisis de 2012, podría alcanzar los 635.000 millones de dólares anuales en cuidados médicos y pérdida de productividad. El coste en sufrimiento es incalculable. Las personas que lidian con este mal afrontan un mayor riesgo de discapacitación, depresión, trastornos del estado de ánimo y del sueño, adicciones al alcohol u otras drogas y suicidio. Linda Porter, asesora en estrategias contra el dolor del Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos e Ictus en Bethesda (Maryland), se refiere a él como «un problema de salud pública enorme, que no se reconoce ni se aborda de modo adecuado».

El dolor tiene una razón de ser: nos proporciona un sistema de alarma contra el daño corporal, que nos lleva a retirar de inmediato la mano de un fogón encendido antes de que esta se queme o a dejar de caminar sobre una pierna si está rota. Pero a veces persiste mucho después de que la amenaza haya desaparecido. Aunque el dolor crónico aparezca de modo inexplicable, puede dividirse en dos categorías: inflamatorio, como el causado por la osteoartritis, y neuropático, que suele derivarse del daño neural provocado por una lesión, enfermedad o alguna otra agresión.

El dolor crónico resulta muy difícil de tratar, en particular el de tipo neuropático, en parte porque los fármacos antiinflamatorios clásicos como el ibuprofeno y el naproxeno apenas lo alivian. La morfina y otros opiáceos constituyen el tratamiento de referencia contra el dolor agudo. Pero conllevan efectos secundarios, desde los más comunes, como el estreñimiento y la somnolencia, hasta una dificultad respiratoria potencialmente mortal. Las personas que los consumen durante un largo período desarrollan tolerancia a ellos y necesitan dosis cada vez mayores, con lo que se elevan los riesgos asociados. La adicción o consumo abusivo de opiáceos plantea asimismo un problema grave: hoy en día mueren más estadounidenses por sobredosis de estos analgésicos, prescritos por el médico, que de sobredosis de cocaína y heroína juntas. Otros fármacos que se emplean en la actualidad para tratar el dolor crónico se prescribían antes para tratar convulsiones y depresión y también presentan limitaciones. A pesar del posible riesgo para el feto, Bond recibió una combinación de opiáceos, anticonvulsivos y antidepresivos para ayudarle a dormir y disminuir su nivel de estrés, peligrosamente alto.

Pese a los mejores esfuerzos, hasta ahora la ciencia no ha hallado otros medicamentos más eficaces y seguros. Sin embargo, el escenario ha comenzado a cambiar. Algunos descubrimientos recientes han apuntado a una serie de opciones prometedoras para el desarrollo de fármacos. Porter afirma que los investigadores están progresando mucho al centrarse en las vías moleculares de señalización del dolor.

CARRERA DE RELEVOS

Para entender los nuevos esfuerzos para controlar el dolor crónico, es útil saber cómo se origina. El mal comienza como un estímulo detectado por unas neuronas especializadas llamadas nocirreceptores, las cuales despliegan sus sensores a lo largo de las superficies internas y extrenas del organismo. Los estímulos que podrían dañarlo (temperaturas muy altas o bajas, fuerzas mecánicas o múltiples amenazas químicas) activan estas terminaciones nerviosas. Y, de inmediato, estas envían señales hacia los somas celulares de los nocirreceptores, alojados en unas estructuras conocidas como ganglios de la raíz dorsal, localizados junto a la médula espinal. Desde allí, los nocirreceptores transmiten la señal de amenaza a otras neuronas de la médula. Estas, a su vez, activan la extensa red cerebral del dolor, que incluye áreas involucradas en el pensamiento y la emoción (lo

Claves para mitigar el dolor

Las señales de dolor generadas por el calor u otros estímulos viajan desde las terminaciones nerviosas en la piel u otros lugares hasta estructuras denominadas ganglios de la raíz dorsal, cerca de la médula espinal, y luego a través de esta hacia el cerebro. Sin embargo, las mutaciones genéticas o las lesiones nerviosas pueden alterar el comportamiento de moléculas clave a lo largo de esta ruta, entre ellas los canales iónicos, de modo que el dolor se convierte en crónico. Con la esperanza de aliviar el sufrimiento, los investigadores intervienen ahora sobre estas moléculas mediante diversas estrategias.

TRPV1

1 El TRPV1 se abre en respuesta al calor y permite la entrada de iones con carga positiva

2 El cambio en el potencial de membrana resultante abre canales de sodio dependientes de voltaje

3 La entrada de iones desencadena la señal de dolor que viaja hacia la médula

Canal Na_v

Canales hiperactivos

En las membranas de las terminaciones nerviosas que perciben los estímulos dolorosos se ubican unas moléculas, denominadas canales iónicos, que abren o cierran un poro central en respuesta a los estímulos. Uno de estos canales, TRPV1, detecta el calor. Cuando se abre, iones con carga positiva (sobre todo, de sodio) se precipitan en el interior, lo que hace aumentar el voltaje de membrana. Como consecuencia, los canales de sodio dependientes de voltaje (Na_v) se abren y envían una señal de dolor a la médula espinal. Las alteraciones en Na_v o TRPV1 pueden causar una señalización excesiva. Se están estudiando una serie de compuestos que podrían disminuir la actividad de estos canales y detener así la señalización demesurada.

Cableado entrecruzado

Algunos nervios que distinguen estímulos sensoriales están especializados en transmitir dolor; otros envían la información del tacto. La comunicación entre ambas vías está regulada por unas células de la médula espinal llamadas interneuronas (*azul*). En las personas con dolor crónico esta regulación suele hallarse alterada, lo que hace que experimenten alodinia (dolor provocado por un estímulo inocuo, como una caricia). Las investigaciones demuestran que este trastorno puede aparecer tras una lesión nerviosa, cuando la microglía (células inmunitarias) libera unas señales químicas que hacen que las neuronas de la médula espinal pierdan una molécula esencial para la señalización normal. Los farmacólogos intentan reparar este cortocircuito para aliviar la alodinia.

Interneurona

Célula de microglía

Hacia los centros cerebrales del tacto

Hacia los centros cerebrales del dolor

Comunicación entre las neuronas del tacto y del dolor

Estímulo sensorial

Ganglio de la raíz dorsal

EMILY COOPER

que explica por qué los placebos o la distracción pueden en ocasiones aliviarlo).

Como todas las señales nerviosas, los mensajes de dolor pasan de una neurona a otra mediante un fenómeno eléctrico denominado potencial de acción, el cual se origina por el flujo de iones (átomos de sodio y potasio cargados eléctricamente) a través de la membrana celular. Estos iones atraviesan diminutos poros en la membrana llamados canales iónicos, constituidos por proteínas que pueden cambiar de forma al adoptar una configuración abierta o cerrada. En las terminaciones de los nocirreceptores, unos canales iónicos especializados detectan posibles amenazas, como el calor o los compuestos químicos desprendidos por células cercanas dañadas. Cuando estos canales se abren, los iones con carga positiva inundan la célula, lo que cambia ligeramente la distribución de cargas a lo largo de la membrana. Esta modificación activa a su vez otros canales iónicos que son sensibles a los cambios de voltaje. Cuando se ha abierto un número suficiente de estos canales dependientes de voltaje, el flujo resultante de iones desencadena un potencial de acción que recorre la neurona en toda su longitud, de forma similar a cuando la muchedumbre en un estadio hace la ola. El potencial de acción culmina con la liberación de un neurotransmisor en la médula espinal, un mensajero químico que transmite información a una célula vecina.

Mucho de lo que hemos aprendido del dolor en los últimos veinte años hace referencia a los canales iónicos: cómo detectan señales tales como el calor o el daño tisular; cuáles de ellos son necesarios para la señalización del dolor, frente a los que prestan una tarea de apoyo; y, tal vez la cuestión más apremiante, sobre qué canales se puede actuar para silenciar de forma segura señales de dolor no deseadas.

Hace tiempo que los investigadores y las compañías farmacéuticas comprendieron que el bloqueo de canales de sodio en las terminaciones nerviosas aliviaba el dolor; cuando se aplican anestésicos locales de acción corta, como la lidocaína y la novocaína, estos taponan los canales de sodio para adormecer no solo el dolor, sino cualquier sensación. Se conocen nueve canales de sodio dependientes de voltaje en humanos y otros mamíferos. Cada uno se abre en respuesta a cambios de voltaje ligeramente diferentes. Anularlos todos podría entrañar efectos devastadores porque estos canales se hallan en todas las células nerviosas del organismo y de otros tejidos, incluidos el cerebro y el corazón; un bloqueo indiscriminado podría interferir con las señales que generan el ritmo cardíaco, la respiración o el movimiento. Por consiguiente, durante años se ha intentado resolver una cuestión fundamental: localizar canales de sodio que estuvieran restringidos solo a las células del organismo sensibles al dolor.

A finales de los años noventa del siglo XX se avanzó un paso hacia ese objetivo con el descubrimiento de tres canales de sodio dependientes de voltaje que aparecían solo en la red de nervios periféricos (pero no en la médula espinal o el cerebro), el lugar donde suelen generarse las señales de dolor. Denominados Na_v1.7, Na_v1.8 y Na_v1.9, se hallan casi de modo exclusivo en los nocirreceptores y otras neuronas implicadas en la sensación. («Na» es el símbolo químico del sodio y «v» hace referencia a «voltaje», mientras que el número indica la posición que ocupan en la familia, formada por nueve miembros conocidos.) Una vez se identificaron los genes que codificaban los canales, se logró manipular la actividad de estos últimos en animales de laboratorio. A lo largo de los últimos diez años los resultados han confirmado que, al menos en ratones, se puede aliviar el dolor neuropático mediante el silenciamiento de los canales sensoriales Na_v.

Hacia el año 2000, tales canales se consideraban dianas prometedoras para el desarrollo de fármacos, pero las compañías farmacéuticas necesitaban pruebas más allá de los estudios en animales que justificaran una inversión mayor. Estas vinieron de cuatro estudios clave que relacionaban el Na_v1.7 y el dolor en personas. En 2004 un grupo de Pekín describió mutaciones en el gen de Na_v1.7 en dos familias chinas con una forma heredada de eritromelalgia, la enfermedad que Bond adquirió de forma espontánea durante el embarazo. En 2005 Stephen Waxman y Sulayman Dib-Hajj, ambos de la facultad de medicina de Yale y del Sistema de Salud para Veteranos de Connecticut, confirmaron que estas mutaciones provocaban una hiperactividad de Na_v1.7 que podía causar dolor. Poco después, John Wood, del Colegio Universitario de Londres, y sus colaboradores publicaron que otra enfermedad (el trastorno de dolor paroxístico extremo, que afecta al recto, los ojos y la mandíbula) se debía también a una mutación que originaba una hiperactividad de Na_v1.7. Por último, Geoff Woods y James Cox, ambos de la Universidad de Cambridge, descubrieron en 2006 que las mutaciones de Na_v1.7 que alteraban su función evitaban también cualquier sensación de dolor, lo que daba lugar a una rara y peligrosa enfermedad que a menudo lleva a una muerte precoz a causa de múltiples heridas no percibidas. En conjunto, todos estos hallazgos en enfermedades genéticas poco comunes confirmaron la importancia de Na_v1.7 en la sensación de dolor en humanos.

«Los investigadores están realizando un gran progreso al centrarse en las vías moleculares de señalización del dolor»

Waxman indaga en los trastornos genéticos raros porque piensa que tal vez le ayuden a identificar vías patológicas más corrientes. En 2012, junto con colaboradores holandeses, se centró en una dolencia algo más común, la polineuropatía de fibras pequeñas, una denominación amplia que hace referencia a lesiones de nervios periféricos sensibles al dolor, habitualmente en las manos o los pies. En casi la mitad de los pacientes diagnosticados con la enfermedad existe una fuente identificable de daño nervioso (como la diabetes), pero en la otra mitad la causa representa un misterio. Waxman y sus colaboradores examinaron el ADN de pacientes de este último grupo y hallaron que casi el 30 por ciento de ellos presentaban mutaciones en los genes de Na_v1.7, el 9 por ciento en los de Na_v1.8 y otro 3 por ciento en los de Na_v1.9. También han observado que las personas con dolor

DESCUBRIMIENTOS

¿Por qué yo?

Una variedad de factores explican por qué algunas personas son más vulnerables que otras al dolor crónico

De entre diez personas que hayan sufrido la misma lesión en la espalda tras un accidente de coche, tres tendrán la mala suerte de acabar con dolor crónico. O de entre diez diabéticos, cerca de la mitad desarrollará daño nervioso o neuropatía, pero la lesión provocará dolor sostenido solo a tres de ellos. ¿Qué factores hacen a unos vulnerables y a otros resistentes? La pregunta no ha sido aclarada aún, pero las investigaciones apuntan a tres factores principales que parecen confluir:

Herencia: Los genes ayudan a determinar la sensibilidad y tolerancia al dolor de un individuo, y algunos inclinan la balanza hacia una vulnerabilidad inusual al dolor crónico. Uno de los principales factores genéticos es el sexo; las mujeres presentan una probabilidad mucho mayor de sufrir dolor crónico a lo largo de la vida que los hombres.

Experiencia: El estrés, un trauma o algún abuso, tanto físico como emocional, pueden aumentar el riesgo. Los estudios sugieren que estas experiencias pueden provocar cambios duraderos en la actividad génica; al activar o desactivar genes, alteran las vías del dolor. Además, el riesgo de dolor crónico aumenta con la edad, no solo a causa del desgaste, sino quizá también porque la capacidad del organismo para reparar las lesiones, incluidas las nerviosas, se reduce según envejecemos.

Personalidad: Ciertos rasgos de la personalidad aumentan el riesgo. Este es mayor en los pesimistas, aprensivos y catastrofistas. Los circuitos cerebrales implicados en la motivación y el refuerzo también parecen influir en la vulnerabilidad al dolor.

crónico por una lesión nerviosa poseen un mayor número de canales Na_v1.7 en los nervios dañados.

Esos hallazgos fueron suficientes para que las compañías farmacéuticas se involucraran seriamente en la investigación de los canales de sodio implicados en la sensibilidad. Pfizer ha estado desarrollando durante varios años fármacos que actúen sobre Na_v1.7 y Na_v1.8. Algunos se están ensayando en pacientes, aunque todavía no se sabe cuándo estará disponible un nuevo analgésico, comenta Neil Castle, de Neusentis, la unidad de investigación de Pfizer, en Carolina del Norte, especializada en los trastornos sensitivos y del dolor. A diferencia de otros medicamentos, como la lidocaína, estas nuevas moléculas no intervienen sobre el poro principal del canal de sodio, casi idéntico en los distintos subtipos de canal. En lugar de ello, lo hacen en una región que percibe el voltaje y varía de un canal a otro, lo que les otorga una mayor especificidad y, presumiblemente, una mayor seguridad. En 2013 el grupo de Castle hizo público el descubrimiento de un compuesto que actuaba selectivamente sobre el sensor de voltaje de Na_v1.7. Según el experto, tales moléculas «poseen una elevada selectividad, por lo que no afectan la función cardíaca ni muscular», conforme se ha visto en las pruebas preliminares.

Mientras tanto, un equipo de la Universidad Duke intenta actuar también sobre el sensor de voltaje de Na_v1.7, pero para ello utiliza un anticuerpo, una molécula derivada del sistema inmunitario. Según un estudio publicado en junio de 2014, el anticuerpo atenúa en ratones tanto el dolor inflamatorio como el neuropático, y además alivia la comezón, lo que podría convertir este enfoque en una estrategia de triple efecto en el ámbito del dolor. Los investigadores que exploran las posibilidades de ciertos componentes presentes en venenos naturales están cosechando asimismo algunos frutos.

CANALES PARA EL CALOR

Los canales de sodio no constituyen el único objetivo de los investigadores. Otro canal iónico, denominado receptor de potencial transitorio V1 (TRPV1), conocido porque es activado por las temperaturas elevadas y la capsaicina (la molécula responsable del sabor picante de las guindillas), se halla en gran medida restringido a las células sensibles al dolor. Desde que David Julius y sus colaboradores descubrieran en 1997 el gen que codificaba TRPV1, no se ha cesado de buscar moléculas que, al cerrar este canal, silenciaran las señales de dolor.

«El TRPV1 ha constituido a la vez una promesa y un objetivo escurridizo durante años», comenta Porter. Las primeras sustancias que lo bloqueaban tenían efectos secundarios intratables, como sobrecalentamiento corporal e insensibilidad al calor (que podía causar quemaduras). En tiempo reciente se ha demostrado que el canal, también sensible a los ácidos, a toxinas provenientes de arañas y a sustancias que producen inflamación, es un integrador complejo de señales sensitivas. Según Julius, «el mejor fármaco no perturbaría la capacidad básica del canal de percibir el calor». Tan solo atenuaría un canal sobreactivado.

El equipo de Julius dio un paso adelante en diciembre de 2013 al publicar las primeras imágenes en alta resolución de la estructura del TRPV1 en varios estados. Esta información debería ayudar a descubrir una manera de inutilizar el canal solo cuando adopte una conformación que genere dolor.

DOLOR MALINTERPRETADO

La mayoría de las personas con dolor neuropático experimentan tres síntomas distintivos: hipersensibilidad a los estímulos dolorosos; dolor espontáneo que aparece de la nada; y alodinia, que convierte en doloroso un estímulo que normalmente no lo es. (La alodinia hacía que a Bond le pareciera una tortura el agua que caía de la ducha.) En tanto que los estudios sobre los canales iónicos han ayudado a explicar la hipersensibilidad, otra línea de investigación ha aclarado cómo se produce la alodinia. Las señales responsables del dolor y del tacto no doloroso viajan por vías nerviosas separadas a través de nervios que van de la piel a la médula espinal y luego hacia el cerebro; pero en la alodinia, las señales se cruzan en la médula espinal y las neuronas sensibles al tacto activan vías del dolor.

El motivo de esa anomalía ha sido aclarado principalmente por investigadores de Japón y por dos grupos en Canadá, uno dirigido por Yves De Koninck, del Instituto Universitario de Salud Mental de Quebec, y el otro por Michael Salter, del Hospital para Niños Enfermos de Toronto. En estudios con animales han descubierto que, como consecuencia de una lesión nerviosa, la microglía (unas células inmunitarias del sistema nervioso con capacidad fagocitaria) libera una señal que hace reducir en las

Toxinas contra el dolor

Ciertas moléculas presentes en venenos naturales podrían brindar una alternativa a los adictivos fármacos opiáceos

Mark Peplow



ANALGÉSICO: El veneno del ciempiés chino de cabeza roja contiene un compuesto que adormece los nervios sin dañar el resto del organismo.

Extraer el veneno de los ciempiés no supone una tarea fácil, explica Gleen King, bioquímico de la Universidad de Queensland. «Los atamos con bandas elásticas, acercamos un par de fórceps eléctricos a sus tenazas, aplicamos un voltaje y los animales expelen el veneno.»

Los microlitros extraídos pueden esconder las claves para una nueva serie de fármacos destinados a aliviar el dolor. Los venenos constituyen reservas naturales de moléculas que adormecen el sistema nervioso, y King, con 400 tipos de veneno en su laboratorio, se sitúa en la vanguardia de los esfuerzos para identificar analgésicos en los aguijones de ciempiés, arañas, caracoles y otras alimañas.

Las grandes compañías farmacéuticas han estado esforzándose en sintetizar una sustancia distinta a los analgésicos adictivos como la morfina, pero han tenido dificultades para hallar moléculas que actuaran específicamente sobre los nervios de interés. Los venenos, sin embargo, han evolucionado de forma natural para contener moléculas con este tipo de especificidad. En animales de laboratorio, estos compuestos adormecen vías nerviosas concretas sin dañar el resto del organismo. Las dianas en las que se están centrando numerosos investigadores son los llamados canales iónicos dependientes de voltaje, habituales en las neuronas que perciben estímulo doloroso. Al obstruir un tipo particular de canal, conocido como $Na_V1.7$, evitan que la célula transmita un mensaje de dolor a otras partes del cuerpo, como se detalla en el artículo principal.

Ciertos componentes del veneno poseen la forma y la actividad química adecuadas para fijarse a una parte del canal denominada sensor de voltaje, una acción que anula todo el canal. En 2013 King identificó la molécula m-SLPTX-Ssm6a, que parece ser uno de los inhibidores más selectivos que se hayan visto nunca del $Na_V1.7$. Lo descubrió en el veneno del ciempiés chino de cabeza roja (*Scolopendra subspinipes mutilans*), que puede alcanzar 20 centímetros de longitud y cuenta con un par de feroces pinzas en forma de tenazas. Su picadura sin duda duele, afirma King. La molécula, no obstante, ejerce el efecto contrario: en experimentos llevados a cabo con ratones, alivió el dolor mejor que la morfina. Y lo hizo sin provocar efectos no deseados en la presión sanguínea, la frecuencia cardíaca o la función motora, lo que indicaba que no deprimía el sistema nervioso central, como haría un opiáceo como la morfina.

El equipo de King produjo una versión sintética para ver si la molécula podía ser fabricada como fármaco. Pero, para consternación de los investigadores, esta versión no funcionó tan bien. El experto sospecha que la preparación inicial de m-SLPTX-Ssm6a en realidad contenía trazas de otro componente activo. Está examinando de nuevo sus ciempiés en busca del misterioso ingrediente.

El veneno de serpiente es también una fuente de inhibidores selectivos de canales. Anne Baron, del Instituto de Farmacología Molecular y Celular en Francia, ha aislado dos moléculas analgésicas del veneno de la mamba negra. «Estamos casi preparados para un ensayo clínico», comenta Baron. «Hemos realizado numerosas pruebas en roedores para evaluar la toxicidad.» Las mambalginas, como se ha llamado a estas moléculas, obstruyen un grupo particular de canales sensibles a los ácidos en neuronas periféricas que, como los canales de sodio, ayudan a las células a enviar señales de dolor. Da la casualidad de que las mambalginas no ejercen efecto en la mayoría de los otros canales iónicos, lo que puede explicar por qué los ratones a los que se inyectó la sustancia no presentaron reacciones adversas aparentes.

Según David Craik, bioquímico de la Universidad de Queensland, actuar sobre las neuronas no constituye el único objetivo de la investigación en venenos. Si las moléculas tóxicas han de poder tragarse como píldoras analgésicas, tienen que evitar ser degradadas por el sistema digestivo. En 2004, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) aprobó el analgésico ziconotide, basado en una molécula aislada a partir de un caracol marino venenoso, *Conus magus*. Pero el fármaco no pudo resistir los rigores del estómago, así que ha de administrarse mediante una bomba de infusión, un procedimiento engorroso. «El ziconotide no ha sido un superventas», apunta Craik.

El experto ha comenzado a rediseñar analgésicos derivados de la toxina de otro cónido, *Conus victoriae*. Su estrategia consiste en transformar las moléculas, formadas normalmente por cadenas de aminoácidos, en anillos. Esta última configuración resulta más estable porque las enzimas del organismo no pueden acceder a los extremos de la molécula y no los pueden cortar. Craik ofreció a ratas el compuesto, apodado cVc1.1, por vía oral y observó que era cien veces más potente que la gabapentina, un remedio habitual para las neuralgias. Y a principios de 2014, en la reunión de la Sociedad Americana de Química en Dallas, hizo públicas cinco conotoxinas circulares que también habían mostrado durabilidad en una serie de estudios previos.

Con cientos de miles de especies venenosas en el mundo, se cree que será solo cuestión de tiempo descubrir un compuesto que actúe sobre la diana adecuada, sea resistente y pueda producirse fácilmente en grandes cantidades. Según Baron, «quizá solo conozcamos un 1 por ciento de los productos que hay en estos venenos».

***Mark Peplow** es divulgador científico.*

neuronas de la médula la reserva de una molécula transportadora de iones llamada KCC2 (las siglas KC corresponden a cloruro potásico). El transportador trabaja para mantener el delicado equilibrio de iones cloruro dentro y fuera de la célula. En condiciones normales, unas pequeñas células de la médula denominadas interneuronas regulan la comunicación entre las vías en las sensaciones dolorosas y no dolorosas. Evitan que el tacto ordinario cause dolor, pero permiten que una caricia reconfortante lo disminuya temporalmente. Sin embargo, cuando las neuronas de la médula espinal pierden KCC2, esta comunicación se altera y un suave contacto puede desencadenar dolor. Los investigadores piensan que si se pudieran restaurar los niveles de KCC2, se detendría la señalización errónea.

El futuro de la medicina personalizada en el campo del dolor crónico está solo empezando a vislumbrarse. Por ahora el tratamiento se basa, incluso en los mejores centros, en el sistema de ensayo y error

En noviembre de 2013, De Koninck y sus colaboradores informaron del descubrimiento de un compuesto que estimulaba el transporte de cloruro a través de KCC2. El fármaco restauraba el equilibrio de iones de cloro y la función eléctrica en neuronas de la médula espinal. Más aún, aliviaba signos de dolor neuropático en ratas. El potenciador de KCC2 era seguro y carecía de efectos secundarios en animales, incluso a altas dosis.

Aunque hasta ahora la investigación solo se ha realizado en animales, ciertos aspectos del transportador KCC2 hacen de él una diana terapéutica prometedora en los humanos. Al contrario de otras sustancias que inhiben los canales iónicos de modo indiscriminado, esta molécula podría actuar solo en células defectuosas, según Koninck. Las que presentan el KCC2 inalterado continuarían funcionando normalmente, y el fármaco no sobrepotenciaría su actividad. Los experimentos indican que el medicamento no modifica el comportamiento de KCC2, sino que dirige una mayor cantidad del transportador hacia la superficie de la célula.

TRATAMIENTO PERSONALIZADO

La mayoría de los investigadores opina que el futuro de la medicina es la personalización, en el sentido de que los genes de una persona y su respuesta específica a los fármacos determinarán el mejor curso de tratamiento y el modo más seguro de prevenir la enfermedad. En el campo del dolor crónico, este futuro tan solo empieza a vislumbrarse. Según David Bennett, neurólogo de la Universidad de Oxford: «Nos encantaría explicar qué funciona mal en cada uno de los pacientes. Entonces podríamos indicar a cada cual el fármaco que más le conviene». Pero el tratamiento, incluso en los centros de manejo del dolor más completos, tiende a basarse en gran medida en el sistema de ensayo y error.

Ahora, sin embargo, los pacientes con mutaciones genéticas raras que afectan a los canales Na_v están ayudando a descubrir el camino hacia una terapia del dolor personalizada. Por ejemplo, la mayoría de las personas que sufren dolor urente en las extremidades a causa de eritromelalgia por una mutación heredada en $Na_v1.7$ no se benefician de la carbamacepina, un anticonvulsivo que en ocasiones se utiliza para tratar el dolor. Sin embargo, existe una familia con la enfermedad asociada a una mutación particular (hay muchos tipos) que sí responde al medicamento. Al estudiar la estructura molecular y la función del canal defectuoso de esta familia, Waxman y Dib-Hajj observaron el modo en que la carbamacepina mitigaba la hiperactividad del canal y luego lograron predecir que también sería eficaz con una mutación un poco diferente. Según Waxman, estos hallazgos resultan emocionantes, porque sugieren que los tratamientos basados en la dotación genética de las personas con eritromelalgia heredada, así como las que sufren trastornos del dolor más comunes, son una idea factible.

En cuanto a Jama Bond, sus síntomas desaparecieron justo antes de que diera a luz, unas semanas antes de lo previsto, a un niño sano. Inesperadamente, las inyecciones de corticoesteroides, destinadas a ayudar a madurar los pulmones del bebé, funcionaron como un talismán para la madre. «Me desperté en mitad de la noche y mis pies no me dolían, algo que no sucedía desde hacía seis meses», comenta. Nadie puede explicar por qué. Los síntomas volvieron más tarde pero nunca con la misma intensidad que durante el embarazo. «Si permanezco de pie durante mucho tiempo, sé que experimentaré dolor. Estoy controlando la situación sin fármacos, lo que me parece increíble. Pero me encantaría curarme.» Y los investigadores en dolor desearían proporcionarle alivio, igual que a los muchos millones de personas que sufren como ella.

PARA SABER MÁS

Black mamba venom peptides target acid-sensing ion channels to abolish pain. Sylvie Diochot et al. en *Nature*, vol. 490, págs. 552-555, octubre de 2012.
Discovery of a selective $Na_v1.7$ inhibitor from centipede venom with analgesic efficacy exceeding morphine in rodent pain models. Shilong Yang en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 43, págs. 17.534-17.539, octubre de 2013.
Pain vulnerability: A neurobiological perspective. Franziska Denk, Stephen B. McMahon e Irene Tracey en *Nature Neuroscience*, vol. 17, págs. 192-200, febrero de 2014.
Regulating excitability of peripheral afferents: Emerging ion channel targets. Stephen G. Waxman y Gerald W. Zamponi en *Nature Neuroscience*, vol. 17, págs. 153-163, febrero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevos analgésicos. Allan I. Basbaum y David Julius en *IyC*, agosto de 2006.
El dolor crónico. R. Douglas Fields en *IyC*, enero de 2010.
Cuando el dolor persiste. Frank Porreca y Theodore Price en *MyC* n.º 56, 2012.



Martin Schultze trabaja en el Laboratorio de Attofísica del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica (MPQ) de Garching.

Ferenc Krausz es director científico en el MPQ y catedrático de física en la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich. En 2001, su grupo de investigación creó el primer pulso láser de attosegundos de duración, lo que por primera vez brindó la posibilidad de resolver procesos físicos con dicha escala temporal.

ATTOFÍSICA

ELECTRÓNICA CON PULSOS DE LUZ

Los pulsos ultracortos de luz láser tal vez ofrezcan una salida al límite con el que pronto chocará la miniaturización de los componentes electrónicos

Martin Schultze y Ferenc Krausz

A mediados del siglo xx, un pequeño dispositivo electrónico desató una revolución tecnológica: el transistor de efecto de campo. Gracias a su capacidad para controlar el paso de la corriente eléctrica, este componente sentaría las bases de los modernos sistemas de comunicación y tratamiento de datos. Hoy, un teléfono inteligente contiene del orden de mil millones de estos transistores. Cada uno de ellos mide apenas unos 20 nanómetros, menos que muchos virus. Sin embargo, la miniaturización de los dispositivos electrónicos alcanzará en breve sus límites físicos. ¿Necesitaremos una nueva revolución?

Los principios de operación de los transistores de efecto de campo se han mantenido invariantes desde que aparecieron los primeros prototipos. Compuestos por semiconductores, pueden concebirse como pequeños interruptores que solo se activan cuando se les aplica una pequeña diferencia de potencial. Cuando eso sucede, el material se torna conductor y transmite la electricidad.

Pero, si bien la miniaturización de los componentes básicos no continuará para siempre, el proceso de conmutación tal vez pueda acelerarse de forma radical. Para ello, en lugar de una diferencia de potencial, lo que dejaría pasar la electricidad a través del dispositivo sería el campo eléctrico de un láser. Si un transistor pudiese controlarse con un pulso de luz láser, tal y como se hace ya en medicina y en técnicas de tratamiento de materiales, sería posible acelerar su funcionamiento hasta la escala del femtosegundo (una milbillonésima de segundo, o 10^{-15} segundos), una velocidad de operación miles de veces mayor que la de los mejores transistores actuales.

En el curso de nuestras investigaciones, hemos descubierto un material (el cuarzo) cuya capacidad de conducción puede activarse y desactivarse mediante pulsos láser ultracortos, en los

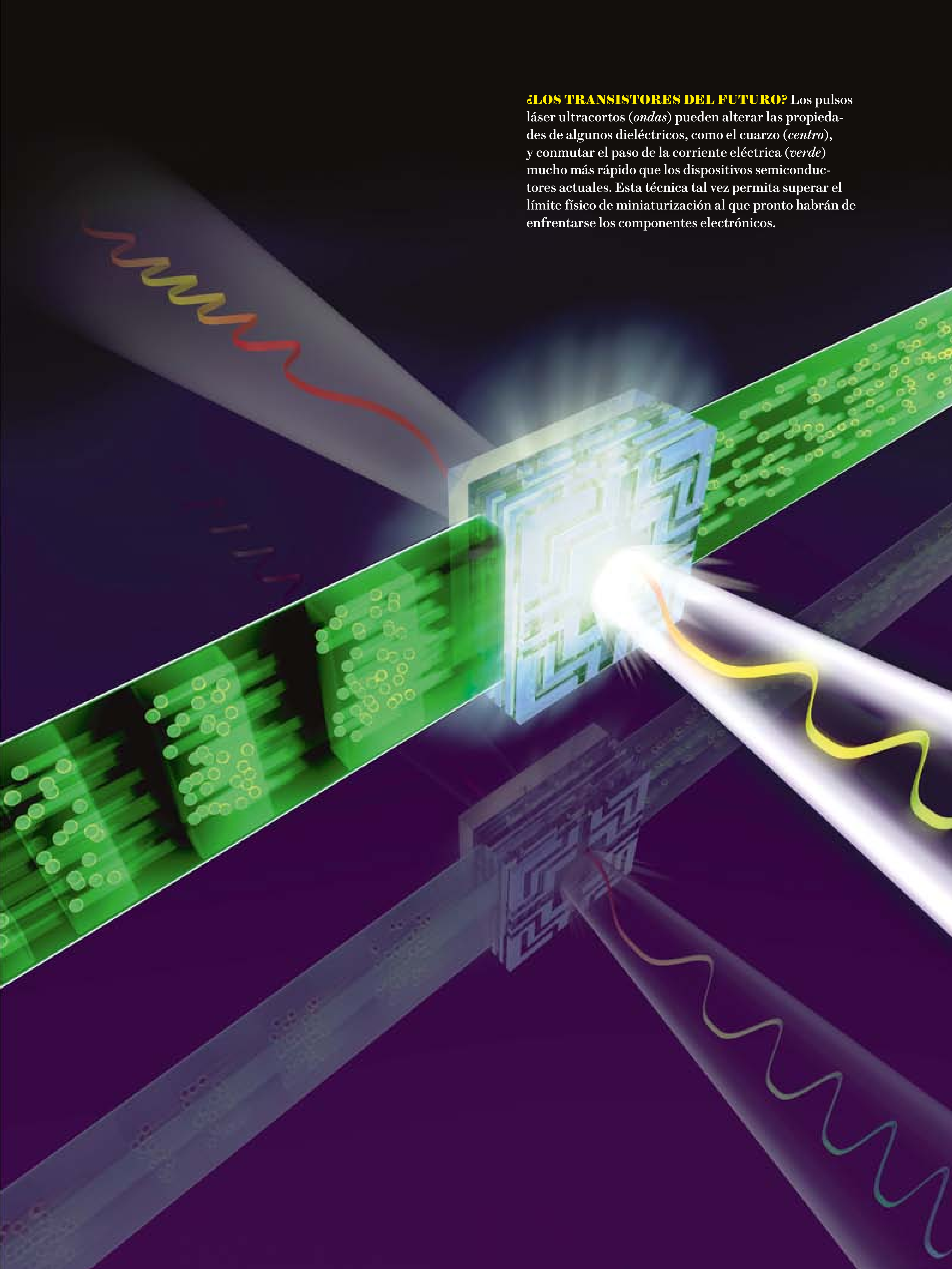
EN SÍNTESIS

Al incidir sobre un dieléctrico, un pulso láser muy intenso puede modificar las propiedades electrónicas del material y hacer que se vuelva conductor.

Dicho efecto resulta similar al que tiene lugar en un transistor semiconductor sometido a una diferencia de potencial, pero opera varios miles de veces más rápido.

El hallazgo ha sido posible gracias al empleo de pulsos láser de attosegundos de duración. Su aplicación a la electrónica podría revolucionar la velocidad de cómputo.

CHRISTIAN HACKENBERGER, UNIVERSIDAD LUDWIG MAXIMILIAN DE MÚNICH



¿LOS TRANSISTORES DEL FUTURO? Los pulsos láser ultracortos (*ondas*) pueden alterar las propiedades de algunos dieléctricos, como el cuarzo (*centro*), y conmutar el paso de la corriente eléctrica (*verde*) mucho más rápido que los dispositivos semiconductores actuales. Esta técnica tal vez permita superar el límite físico de miniaturización al que pronto habrán de enfrentarse los componentes electrónicos.

que el campo eléctrico apenas completa unas pocas oscilaciones. Estos pulsos, desarrollados en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, nos han permitido entender la dinámica de los procesos de activación por medio de destellos luminosos. Para explorar en detalle tales fenómenos, que ocurren en la escala del femtosegundo, fue necesario subdividirlos en procesos aún más breves. A tal fin tuvimos que emplear técnicas de attofísica, una disciplina que comenzó su andadura hace unos diez años y que permite estudiar fenómenos que suceden en pocas trillonésimas de segundo (10^{-18} segundos).

UN LÁSER INUSUAL

Desde hace unos veinte años, resulta posible generar pulsos láser de unos pocos femtosegundos de duración, lo que equivale a unas pocas oscilaciones del campo eléctrico. Ello se consigue gracias a láseres muy distintos de los tradicionales. La diferencia más evidente es el color blanco de su luz, ya que su espectro incluye multitud de frecuencias, o colores. Esta propiedad es lo que permite que los pulsos resulten tan breves, ya que, en general, la duración de una señal y su amplitud espectral guardan una relación inversa. Además, la separación entre dos pulsos individuales resulta infinita a efectos prácticos: cada segundo, uno de estos láseres emite del orden de mil pulsos de femtosegundos de duración. Para entender mejor esta proporción, pensemos que, si uno de estos dispositivos estuviese funcionando ininterrumpidamente durante cien años, solo radiaría el equivalente a un pulso de una milésima de segundo.

Por un lado, nos propusimos emplear estos pulsos láser ultracortos para modificar de manera controlada las propiedades de los materiales que investigábamos. Por otro, gracias a ellos logramos también estudiar los procesos que la luz inducía en el material. Para lograrlo nos servimos de un fenómeno estrechamente relacionado: la generación de destellos de rayos X de attosegundos de duración.

Cuando un pulso láser de unos pocos femtosegundos excita los electrones de la envoltura atómica, estos emiten destellos de rayos X de unos 70 attosegundos; hoy por hoy, las señales más breves que la técnica puede producir. Estos permiten estudiar en tiempo real el movimiento de los electrones en el interior de átomos y moléculas, así como la dinámica electrónica de un sólido. Dado que dichos destellos de rayos X son generados a partir de pulsos de luz láser, gozan de las propiedades ideales para efectuar mediciones de gran resolución temporal: ambas emisiones forman un par de pulsos perfectamente sincronizados y cuya secuencia temporal puede regularse con gran precisión.

Tales propiedades han hecho posible el desarrollo de la técnica conocida como «bomba-sonda» (*pump-probe*), la cual se emplea para investigar procesos que, a causa de su rapidez, no pueden analizarse por otros métodos. En ella, un primer pulso láser (la bomba) excita los electrones del material objeto de estudio. Luego, tras un intervalo temporal prefijado, el efecto provocado por ese primer pulso se mide con ayuda de un pulso de rayos X de pocos attosegundos (la sonda). La resolución temporal de esta técnica solo se ve limitada por dos aspectos: por un lado, la duración del pulso de rayos X; por otro, el valor más pequeño en que resulta posible variar el intervalo temporal entre ambos pulsos. Ambas cantidades se encuentran hoy en el dominio de unas pocas decenas de attosegundos. La repetición de las mediciones a distintos intervalos de tiempo permite registrar de manera gradual el efecto estudiado, como si se tratase de los fotogramas de una película. Ello permite revelar procesos que apenas duran unos pocos attosegundos.

Esta técnica resulta ideal para investigar el comportamiento de los electrones en un sólido que interacciona con el intenso campo eléctrico de un pulso láser de corta duración. Por esta razón, constituye la herramienta perfecta para abordar nuestra pregunta: ¿podemos conseguir que en un material se den procesos de conmutación activados por luz?

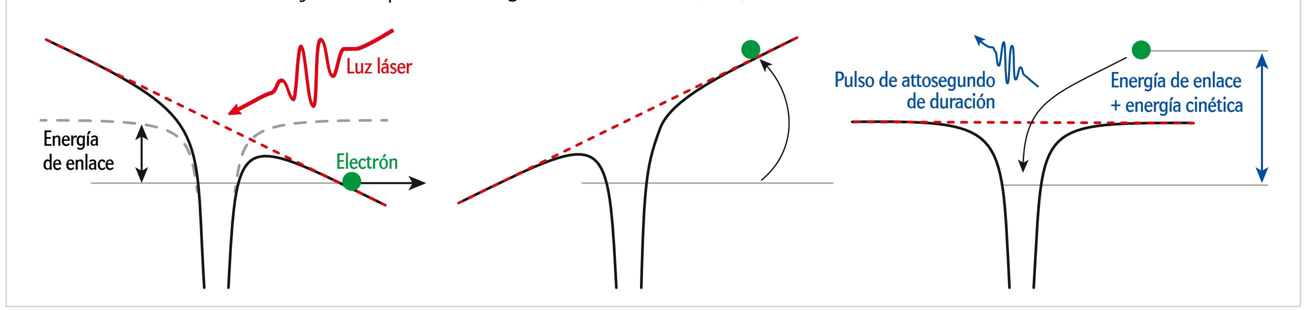
¿EL FIN DE LA LEY DE MOORE?

Los átomos de un sólido cristalino forman un retículo tridimensional. Comparten entre sí algunos de sus electrones, por lo que los nodos de la red pueden considerarse iones de carga positiva. Si un electrón se desplaza a través del retículo, los átomos del cristal y el resto de los electrones ejercerán una fuerza sobre él. Dicha fuerza, que cambia de forma periódica en el espacio, tiene como consecuencia que el electrón únicamente puede alcanzar

EN EL DOMINIO DEL ATTOSEGUNDO

Generación de destellos ultracortos de rayos X

Los pulsos láser de femtosegundos permiten generar destellos ultracortos de rayos X. Cuando la luz láser incide sobre un átomo de gas noble, el campo eléctrico del pulso (*rojo*) deforma por un instante el pozo de potencial que mantiene a los electrones en el átomo (*línea gris discontinua*). Como consecuencia, un electrón puede verse acelerado por el campo eléctrico del láser y abandonar el potencial atractivo (*izquierda*). Tras medio período de oscilación, el campo del láser cambia de signo (*centro*), el electrón es acelerado hacia el núcleo atómico y recupera su antiguo estado en el pozo de potencial (*derecha*). El exceso de energía cinética es entonces radiado en forma de un destello de rayos X de pocos attosegundos de duración (*azul*).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN MARTIN SCHULTZE Y FERENC KRAUSZ



MICROSCOPIO TEMPORAL: En el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, los investigadores hacen pasar un gas noble por un pequeño tubo hasta el interior de una cámara sobre la que se disparan intensos pulsos láser (*fotografía*). Una vez excitados, los átomos del gas generan destellos de rayos X extremadamente cortos, gracias a los cuales los físicos pueden estudiar el movimiento de los electrones en átomos, moléculas y sólidos.

THORSTEN NAESER, LMU

determinadas velocidades de propagación y, por ende, su energía solo puede tomar ciertos valores. Dichos niveles energéticos se agrupan en bandas, las cuales dan cuenta de las propiedades electrónicas de un sólido.

Al contrario que en los metales, las bandas de energía de los semiconductores y los aislantes se encuentran separadas por «huecos». Ello significa que, entre los niveles de energía que pueden adoptar los electrones cuando sobre ellos no se ejerce ninguna influencia externa (la banda de valencia) y los niveles a los que una excitación puede promocionarlos (la banda de conducción) media una diferencia energética. Por tanto, para que el material conduzca la electricidad, será necesario inducir en él algún proceso que comunique a los electrones de valencia la energía suficiente para excitarlos a la banda de conducción. La conductividad de un material depende del número de electrones presentes en dicha banda.

En los transistores de efecto de campo, lo que promociona los electrones a la banda de conducción es una diferencia de potencial externa. La concentración de portadores de carga en dicha banda puede controlarse por medio de la tensión aplicada y, con ella, activar o desactivar la capacidad de conducción del transistor. La velocidad de conmutación puede aumentarse de dos maneras: incrementando la pureza del material o reduciendo el tamaño de las estructuras. El primer factor facilita el transporte de electrones, mientras que el segundo reduce el número de portadores de carga que es necesario excitar para alterar la conductividad. A lo largo de las últimas décadas, la mejora en los procedimientos para preparar cristales de alta pureza y componentes cada vez menores ha permitido obtener enormes velocidades de conmutación. En condiciones de laboratorio, hoy resulta posible preparar estructuras de unos 10 nanómetros y alcanzar velocidades de hasta 100.000 millones de conmutaciones por segundo, lo que corresponde a un tiempo de conmutación de unos 10.000 femtosegundos.

Incrementar aún más la velocidad mediante estos procedimientos se ha revelado problemático por diferentes motivos. Seguir miniaturizando los dispositivos supone un desafío no solo por la complejidad del proceso de fabricación, sino porque, en estructuras que solo miden unos pocos nanómetros, las propiedades cuánticas de los electrones se tornan aún más manifiestas. Si los portadores de carga ven reducido de manera considerable el espacio que tienen a su disposición, los niveles de energía permitidos se separarán y las condiciones de movilidad de los electrones se modificarán. Los modelos de bandas simples, que tratan los portadores de carga de forma colectiva, ya no bastarán para describir el comportamiento del material. Y aunque desde un punto de vista científico resulte interesante diseñar estructuras tan diminutas y estudiar su alterado paisaje energético, técnicamente sería muy complicado emplearlas con fines prácticos. Todo ello podría acarrear el fin de la célebre ley de Moore, según la cual el número de conmutadores contenidos en los circuitos integrados comerciales se duplica cada dos años.

A lo anterior hemos de añadir que, en un semiconductor de tamaño tan reducido, cuando se aplica un voltaje externo los electrones experimentan fuerzas cada vez mayores. Estas pueden llegar a ser equiparables a las de los enlaces entre los átomos del material, por lo que la muestra puede verse afectada de manera considerable. Incluso en el laboratorio, resulta muy difícil trabajar en tales condiciones sin destruir el material en el intento.

CONMUTACIÓN ULTRARRÁPIDA

Tales restricciones marcaron el punto de partida para nuestros experimentos con láseres ultracortos. Concentrar la energía luminosa en intervalos extremadamente breves tiene una consecuencia fundamental: aunque el promedio temporal de la potencia radiada sea modesto, durante el pulso se alcanzan campos eléctricos más intensos que los obtenidos mediante cualquier otro procedimiento. Además, resulta posible enfocar la luz sobre superficies muy reducidas. Para conseguir campos similares con técnicas tradicionales, deberíamos mantener el campo eléctrico generado por una línea de alta tensión entre dos electrodos separados pocos micrómetros. Por el momento, no se conoce ningún material capaz de resistir tales condiciones.

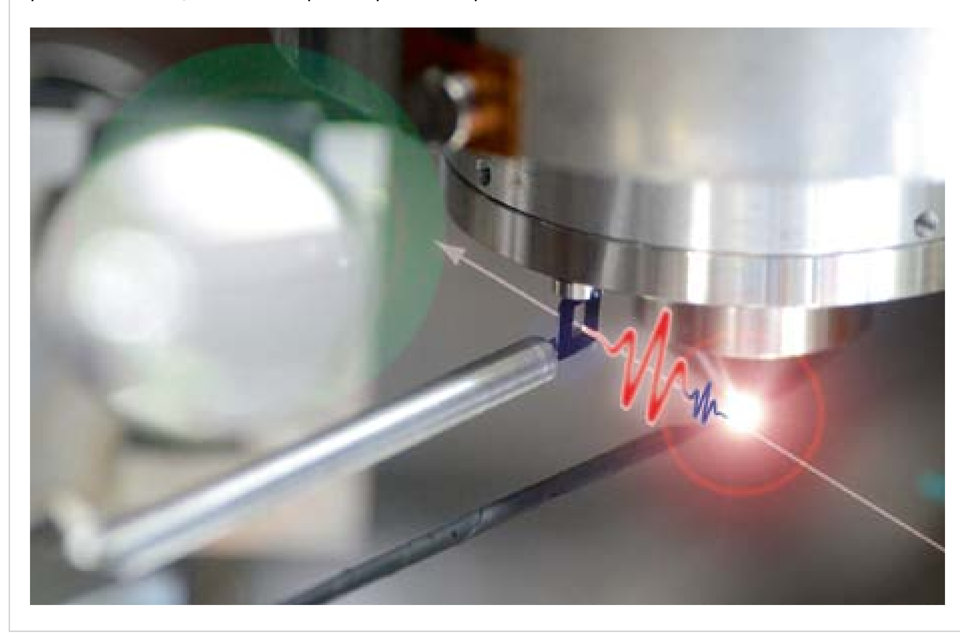
Con pulsos láser de femtosegundos de duración, la situación cambia. El campo asociado a dichos pulsos alcanza fácilmente valores próximos a los del ejemplo anterior. En un semiconductor de silicio, ello equivale a una diferencia de potencial de 5 voltios en una distancia de medio nanómetro, la separación

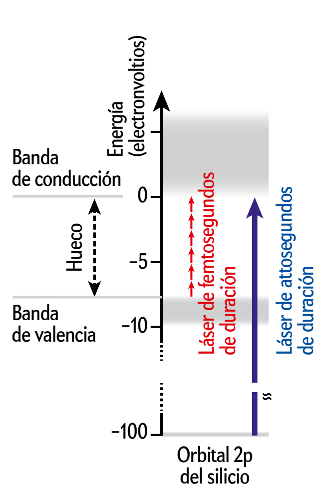
De aislante a conductor

Un pulso láser de femtosegundos de duración (*onda roja*) incide sobre una muestra de cuarzo (*centro, con marco oscuro*). Mientras tanto, una sucesión de pulsos de pocos attosegundos (*onda azul*) permite obtener una serie de «fotogramas» que revelan la estructura electrónica del cristal.

Para excitar los electrones desde la banda de valencia hasta la de conducción, se requieren varios fotones simultáneos (*esquema, flechas rojas*), ya que cada uno de ellos transporta solo una sexta parte de la energía necesaria para superar la separación entre las bandas. La concurrencia de varios fotones es posible gracias a la elevada intensidad del láser.

Los rayos X del pulso láser de attosegundos (*esquema, flecha azul*) pueden excitar electrones desde una capa atómica más interna hasta la banda de conducción. Si en esta ya hay portadores de carga, dicho proceso se verá suprimido. De esta manera, el grado de absorción de rayos X permite verificar si, debido al efecto del pulso láser de femtosegundos, la muestra se ha vuelto conductora o no.





típica entre dos átomos vecinos del retículo. Un campo eléctrico estático de semejante intensidad destruiría de inmediato el material. Sin embargo, en el campo oscilante de nuestro pulso láser, el valor máximo se alcanza solo unas pocas veces y durante una fracción de femtosegundo. Al ser tan breve, los materiales pueden tolerar campos incluso más intensos.

Lo anterior se aplica, sobre todo, a materiales que no absorben luz en la zona visible del espectro ni en el infrarrojo cercano. Entre ellos se encuentran el dióxido de silicio (cuarzo), el diamante, el zafiro u otros cristales transparentes, aislantes y con una gran separación entre las bandas de valencia y de conducción. Como consecuencia, excitar un electrón de la primera a la segunda requiere aplicar un campo eléctrico muy intenso, correspondiente a una tensión de varios voltios entre dos átomos vecinos. Dicho efecto era el que buscábamos para lograr que un aislante llegase a conducir la electricidad.

Para nuestros experimentos elegimos el cuarzo. Empleamos la técnica de bomba-sonda para estudiar los cambios en la estructura electrónica de una muestra delgada en el campo de un pulso láser ultracorto. Junto con el pulso láser, irradiamos el cristal con un destello de rayos X de menos de 100 attosegundos, en torno a una quincuagésima parte de la duración del pulso láser. Medimos la intensidad con que el material absorbía el pulso de rayos X en función del momento de irradiación, el cual podía establecerse con una precisión de pocos attosegundos; es decir, una pequeña fracción de la duración del pulso. Cada señal nos brindó así una «fotografía instantánea» del proceso, a partir de lo cual pudimos deducir la configuración electrónica del cristal en diferentes instantes de la acción del pulso láser.

Comenzamos con pulsos láser cuyo campo eléctrico tenía una intensidad menor. La muestra se comportó según lo que cabía esperar de un medio transparente: reflejaba una pequeña fracción de la luz visible del pulso de femtosegundos, mientras la mayor parte atravesaba el material sin mayores impedimentos. La luz de rayos X del pulso de attosegundos era absorbida en cierta medida. Representamos la señal de absorción de rayos X y no hallamos ningún indicio de que las propiedades electrónicas del material se hubieran alterado por la acción del láser. De ser el caso, la luz visible habría promocionado los electrones a los niveles de la banda de conducción y, una vez ocupados, estos no habrían podido participar de las transiciones inducidas por los rayos X. Ello habría debilitado la absorción de estos rayos, cosa que no observamos.

Después incrementamos la intensidad del campo eléctrico del láser hasta casi alcanzar el umbral de ruptura dieléctrica, lo que habría destruido la muestra. Al final, medimos en la señal de absorción de rayos X el efecto que esperábamos: a medida que el campo eléctrico del láser alcanzaba su máximo, el cristal dejaba pasar más radiación X. Cuando analizamos la señal y la comparamos con los cálculos cuánticos, los resultados confirmaron nuestra interpretación. Los estados energéticos de los electrones se habían distribuido por un instante de otra manera.

THORSTEN NAESER/UNIVERSIDAD LUDWIG MAXIMILIAN DE MÚNICH Y ELISABETH BOTHSCHAFTER/UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MÚNICH (*fotografía*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* SEGÚN MARTIN SCHULTZE Y FERENC KRAUSZ (*esquema*)

Según los cálculos realizados por nuestros colaboradores de la Universidad estatal de Georgia en Atlanta, el intenso campo eléctrico del pulso láser debía modificar el estado de la muestra durante una fracción de femtosegundo, de modo que algunos electrones se encontrasen transitoriamente en la banda de conducción del material. Una situación como esta, en la que un material se convierte en conductor, solo se había observado en metales y semiconductores.

También comprobamos que, una vez acabada la acción del pulso láser, la muestra volvía a su estado no conductor. El cambio inducido por la luz podía activarse y desactivarse, pues, en menos de un femtosegundo. A este respecto, el comportamiento de un dieléctrico difiere de manera fundamental del de un semiconductor. En estos últimos, los electrones permanecen en la banda de conducción por un tiempo que resulta varias veces mayor que la duración del pulso de excitación; solo después vuelven de forma espontánea a la banda de valencia. Dicho intervalo es del orden del nanosegundo, por lo que este método no podría aplicarse a la construcción de conmutadores ultrarrápidos. Aunque un pulso láser sí puede activar un componente semiconductor en pocos femtosegundos, sigue siendo necesario esperar un tiempo mucho mayor hasta que el sistema regresa al estado no conductor.

La attofísica permite observar el movimiento de los electrones en átomos, moléculas y sólidos, y su dinámica puede controlarse por medio del campo eléctrico de pulsos luminosos en los que la onda solo completa unas pocas oscilaciones. El hecho de que dichos pulsos puedan alterar durante unos pocos femtosegundos las propiedades eléctricas y ópticas de un material no conductor tal vez allane el camino para acelerar de manera considerable las técnicas de procesamiento de señal.

Los circuitos lógicos controlados mediante pulsos de luz podrían revolucionar la velocidad de cálculo. Si bien ello no supondría un cambio de paradigma conceptual, como el que intenta conseguir la computación cuántica, tendría la ventaja de que podría desarrollarse sobre tecnología y protocolos probados. En este sentido, la attofísica nos ha enseñado que el límite en la velocidad de conmutación de los componentes electrónicos viene dado por la frecuencia de la luz: una velocidad incomparablemente mayor que la de los mejores microprocesadores actuales.

PARA SABER MÁS

Optical-field-induced current in dielectrics. A. Schiffrin et al. en *Nature*, vol. 493, págs. 70-74, 2013.
Controlling dielectrics with the electric field of light. M. Schultze et al. en *Nature*, vol. 493, págs. 75-78, 2013.
Attosecond metrology: From electron capture to future signal processing. F. Krausz y M. Stockman en *Nature Photonics*, vol. 8, págs. 205-213, 2014.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Materia luminosa

En poco más de cinco décadas después de su invención, el láser se ha convertido en una herramienta indispensable en casi todos los ámbitos de nuestra sociedad, incluido el de la divulgación científica

En una noche de primavera, un grupo de personas permanece a la intemperie; desafían las condiciones ambientales junto a un tubo blanco montado sobre un sofisticado soporte mecánico. Alguien señala al cielo y explica suculentos detalles sobre la dinámica de los cuerpos celestes. Se ayuda para ello de un rayo verde que emerge de sus manos como por arte de magia. Es un láser, un puntero que emite un rayo de luz prácticamente lineal que se pierde, absorbido por la atmósfera, en la lejanía.

El puntero láser ofrece una maravillosa metáfora del control que tenemos hoy sobre la luz. Y son tantísimas las áreas científicas y técnicas que lo emplean, que la UNESCO ha declarado el 2015 Año Internacional de la Luz y sus Aplicaciones.

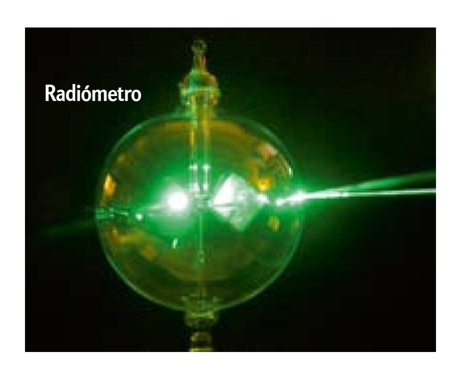
La ciencia que ahonda en la generación, el control y la detección de la luz es la fotónica. Se centra en el estudio de las propiedades y aplicaciones de un fragmento del espectro electromagnético que ofrece una gran variedad de comportamientos: el que incluye las radiaciones infrarroja, visible y ultravioleta.

Bombillas de luz infrarroja, visible y ultravioleta

Quizás es por esa diversidad de fenómenos que las mentes más despiertas de todos los tiempos han tratado de comprender qué es exactamente la luz. En esta colaboración seguimos sus pasos con siete experimentos de facilísima reproducción.

Antes que nada, necesitamos encontrar un puntero láser. Por pocos euros podemos conseguir una extraordinaria fuente de luz de color verde, algo inexistente hace solo diez años. Se convertirá en una herramienta fundamental para interrogar la naturaleza, descubrir las sutilidades de la luz y —atención— para demostrar todo ello de forma visual ante nuestros alumnos y audiencias. Manos a la obra.

1 Luz para empujar. Apuntemos con nuestro rayo verde a las aspas de un radiómetro (un instrumento que se utiliza para medir la intensidad de la energía térmica radiante y que puede encontrarse en las tiendas de los museos de ciencia). Para sorpresa de todos, empezarán a girar.



Sí, la luz es información, pero también energía, algo que todos tenemos claro porque a menudo la percibimos asociada al calor. Pero el radiómetro nos ofrece una visión más impactante de esa energía, ya que convierte la radiación en movimiento mecánico. Algo interesante de esta demostración es que podemos imaginar la luz como un conjunto de misteriosas partículas invisibles que chocan contra las aspas del molinete, transfiriendo su energía [*véase* «El molinete de luz», por Wolfgang Bürger; Investigación y Ciencia, junio de 2001; «Empuje lumínico», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, marzo de 2010].

2 Luz que produce luz. Centrémonos ahora en otro experimento esclarecedor y fácil. Sabemos que la luz es una excelente aliada a la hora de analizar compuestos químicos, ya que cada elemento emite un espectro característico cuando tiene la energía suficiente. Si esparcimos sal común sobre una llama poco luminosa, esta se tornará de un vivo color amarillo. Sabremos así que en la sal de mesa se esconde un metal, el sodio. Y si quemamos compuestos de diversos elementos químicos obtendremos espectros característicos.

Pero la propia luz puede forzar la aparición de firmas lumínicas. Armados con nuestro puntero láser, podemos detectar (científicamente) la calidad de un aceite de oliva sin abrir la botella. Al iluminar el aceite de oliva virgen, y solo este, veremos cómo el intenso rayo verde muta mágicamente para tornarse rojo. Hemos estimulado la aparición de una radiación secundaria, menos intensa que la primaria. De alguna forma, la luz verde procedente del láser ha sido absorbida por moléculas que solo se hallan presentes en los aceites obtenidos en frío.



De nuevo, resulta práctico imaginar la luz como paquetes de energía capaces de ser absorbidos por una molécula específica, un pigmento en este caso, la clorofila. Cuando esta absorbe energía, los elec-

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE MARC BOADA FERRER

trones de algunos de sus átomos pasan a un estado más energético; cuando estos «caen» a un nivel más estable, emiten un nuevo paquete de energía (un fotón, o un cuanto) que percibimos en forma de luz roja. ¡También el láser verde que tenemos en las manos funciona de forma parecida! En su interior se esconde una fuente primaria, un diodo láser de infrarrojos, que, al atravesar un cristal adecuado, produce una emisión secundaria en el visible de color verde y, por supuesto, calor. He aquí el motivo por el cual estos dispositivos son tan baratos: los fabricantes se aprovechan de una argucia fotónica para simplificar su producción.

❸ **Luz absorbida.** Podemos también experimentar con otro aspecto, más ruidoso, de la absorción selectiva. Sabemos que un filtro de color absorbe todas las radiaciones y deja pasar solo algunas, las que vemos. Si situamos un filtro rojo ante una fuente de luz blanca, vemos la lámpara perfectamente roja; ha absorbido todos los otros colores. Por tanto, si colocamos este mismo filtro ante el haz verde de nuestro láser, este no puede pasar. Aunque refleja buena parte de la luz, el filtro deberá pagar un precio energético por absorber la energía e impedir su paso.


Reflexión del verde en un filtro rojo

Mirémoslo con atención. Si es de plástico delgado, podremos observar una pequeña quemadura: la energía se ha disipado en forma de calor. Pero nuestra audiencia se merece mejores demostraciones. Pongamos un globo rojo bien inflado en el trayecto del rayo verde. Fijemos el globo y el láser de forma que este apunte siempre exactamente en el mismo punto. El globo explotará al instante, para sorpresa del público y nuestro regocijo. Si el láser hace esto con un globo, ¿cuán peligroso puede llegar a ser para los glóbulos oculares de los astros del balompié o de los propios experimentadores?

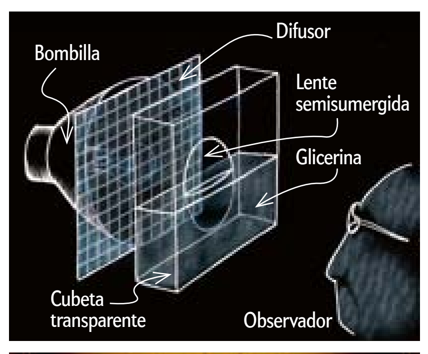
A estas alturas habremos descubierto que el láser se refleja y refracta continuamente, tomando direcciones imprevistas. Vayamos por partes y recordemos las lecciones de la clase de óptica. Allí se nos explicó que, cuando atraviesa una sustancia o un medio denso, la luz viaja a menor velocidad que en el vacío. A la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y en el seno del material a examen lo llamamos índice de refracción. Por otro lado, si la incidencia en el medio es perpendicular a la interfase, la trayectoria no sufre desviación alguna y continúa en línea recta; eso sí, a menor velocidad. Pero si la incidencia se realiza en cierto ángulo, sufre una desviación característica.

Llevamos unos 2500 años dedicados a la óptica, aprovechando estas propiedades y construyendo elementos capaces de desviar la luz de forma controlada, con el objetivo de formar imágenes o concentrar la radiación. Las primitivas lentes talladas en cristal de roca, piedras preciosas o vidrio más o menos transparente han sido sustituidas por materiales ópticos extraordinarios. Fabricamos lentes a partir de monocristales de silicio, germanio, cloruro sódico o fluorita, capaces de focalizar desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Fundimos fibras del grosor de un cabello y kilómetros de longitud con un grado de transparencia tal que la luz viaja en su interior con atenuaciones mínimas. Y los polímeros también se han unido al selecto grupo de los materiales ópticos, al que solo acceden compuestos de pureza perfectamente controlada, fruto, a su vez, del uso de la fotónica en las ciencias químicas.

Por todo ello, es hoy muy fácil demostrar, mediante otro sencillo y fascinante experimento, el comportamiento refractivo de los medios y superficies.

❹ **Luz que se refracta.** Busquemos una lente de metacrilato —tanto da que sea positiva o negativa—. Si decidimos fabricarla nosotros, podemos obtener una lente cilíndrica a partir de una barra de metacrilato, que seccionaremos por la mitad y luego puliremos. Construyamos una fuente de luz extensa con una bombilla mate y un difusor. Pongamos ante este una cubeta llena hasta la mitad con glicerina (una placa de cultivo a la que se ha recortado el cuello resulta óptima). Sobre el difusor y con un rotulador negro, trazaremos un retículo. Si ante este ponemos la lente, la veremos deformada; si ahora la sumergimos en la glicerina, desaparecerá, convirtiéndose literalmente en invisible.

Abusando del lenguaje, podríamos decir que a la luz no le importa si algo es sólido o líquido, lo único que tiene en cuenta son los cambios en el índice de refracción. Dado que glicerina y metacrilato presentan un índice de refracción idéntico, una vez sumergida la lente, el conjunto se convierte ópticamente en un solo cuerpo, con todas las superficies perpendiculares a la luz, y el retículo se observa sin deformaciones. Hemos conseguido la invisibilidad de la lente.




Lente semisumergida en glicerina

En esas observaciones, el modelo mental que usamos para trabajar no necesita ni partículas ni ondas; solo rayos, unas entidades que definen la dirección en la que se propaga un flujo de energía o un estrecho haz de partículas. Por eso a una fuente de luz láser la llamamos rayo láser.

Podemos fabricar fácilmente lentes de todo tipo en metacrilato o espejos en aluminio macizo. Cualquier tornero podrá mecanizarlas y pulirlas. El resultado será patético desde el punto de vista del óptico, pero, junto con el láser, será perfecto para mostrar a todos cómo lentes con diversos perfiles modifican el trayecto óptico y también cómo estas lentes sumadas permiten ampliar imágenes, tal y como hacen microscopios y telescopios.

La luz no solo se refracta; también se refleja. Tras el vidrio del espejo del baño hay una capa de aluminio purísimo. Un metal barato que refleja con igual intensidad todos los colores del espectro visible, de ahí su aspecto «plateado». Una capa

de unos pocos centenares de átomos es ya totalmente opaca y, por tanto, refleja toda la luz posible (sin embargo, la reflexión no es perfecta; una parte de la radiación incidente se absorbe y, por tanto, el reflector se calienta). Para el experimentador, una de las muchas diferencias prácticas entre refracción y reflexión es que esta última es idéntica para todos los colores; es decir, en un espejo todos los rayos, sean de la frecuencia que sean, van a parar al mismo foco.

Esa ausencia de aberración cromática se aprovecha para construir con espejos cocinas solares y objetivos para grandes telescopios; también para microscopios, aparatos donde las condiciones de calidad óptica sí son extremas. Por suerte, nuestro pequeño láser es una fuente prácticamente monocromática en la que todos los paquetes de energía o todas las ondas tienen exactamente las mismas características. Ello nos permite acceder a los límites de la óptica de forma sencilla y sin lentes carísimas. ¿Dónde están esos límites? Pues en el mundo de la física ondulatoria. Expliquémonos. Tal y como hicieron grandes pensadores, ha llegado el momento en que debemos abandonar, al menos temporalmente, nuestra concepción corpuscular de la luz. Sale más a cuenta abrazar una visión ondulatoria porque, en caso contrario, lo que observaremos será inexplicable. Visualicemos algunos fenómenos.

5 **Luz que se dispersa.** Antes no lo hemos dicho, pero la refracción en un medio transparente también depende de la longitud de onda de la luz y de las propiedades intrínsecas del medio —es por ello por lo que Newton pudo descomponer la luz blanca con un prisma de vidrio al plomo mejor que con cualquier otra cosa de la época—. Hoy los vidrios densos han sido superados por los materiales fotónicos o no lineales que imitan y mejoran el comportamiento y fulgor de ciertos minerales, como los ópalos.


Prisma de ópalo artificial

Buscando un poco —o mucho— en tiendas de minerales y esoterismo quizás encontremos alguna pequeña figurilla realizada en ópalo artificial de las que se utilizan para «abrir los *chacras*». Nosotros le podemos dedicar una buena sesión de pulido óptico para convertirla en un prisma de propiedades fascinantes [*véase* «La máquina de Draper», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, junio de 2008].

En la masa vítrea de un material fotónico hay redes simétricas de defectos [*véase* «Ópalos y cristales fotónicos», por Francisco J. Meseguer y otros; Investigación y Ciencia, febrero de 1999]. Imaginemos estructuras diminutas que se repiten una y otra vez o agrupaciones de tamaño equiparable a las ondas luminosas; su interacción con la luz hace que la respuesta sea sensible a la longitud de onda.

Un vidrio fotónico presenta un comportamiento similar al de la atmósfera durante una puesta de sol. Los rayos azules procedentes del astro rey son fuertemente dispersados, de ahí el color azul del cielo. Los rayos rojos, en cambio, no son dispersados y pueden alcanzar al observador; por ello nuestra estrella se torna rojiza. Los cristales fotónicos pueden ser de color azul cuando se observan por reflexión y rojos cuando se observan por transmisión. Jugando un poco, comprobamos que también la reflexión total interna solo es posible para el rojo; vendría a ser la suma de un prisma y un filtro selectivo.

Aquí, la visión ondulatoria resulta adecuada para explicar el fenómeno, pero es más útil todavía para comprender lo que sigue.

Todo observador astronómico sabe que, al aumentar mucho la imagen de un astro, este deja de ser puntual para convertirse en una bonita y estrellada figura de difracción. El motivo es simple: el frente de luz proveniente de una luz muy lejana es una onda plana. Al atravesar la atmósfera y luego el sistema óptico, incorpora retrasos diferenciales que, al superponerse en el foco, interfieren entre sí. Lo mismo sufre el microscopista, por muy bueno que sea el microscopio; llegado a determinado aumento, los microorganismos aparecen rodeados por anillos luminosos que se alternan con otros oscuros creando ruido e inutilizando la imagen. Precisamente una óptica de calidad es aquella que es capaz de minimizarlos.

Nuestro láser proporciona un frente de onda prácticamente plano, continuo y, además, colimado: un haz de luz que permite construir un microscopio donde la interferencia aparece con enorme facilidad, mostrándonos imágenes muy interesantes, similares a las que ofrecen los instrumentos ópticos más potentes cuando trabajan a su máximo rendimiento.

6 **Luz para observar el microcosmos.** Fijemos el láser a un soporte de madera y, con una escuadra y algún ingenio, coloquemos ante él y en posición vertical una jeringuilla llena de agua, de la que cuelgue una sola gota. Ajustemos el láser para que incida sobre la gota y proyectemos la mancha de luz sobre una pantalla situada a algunos decímetros de distancia.

Enfoquemos acercando el láser a la gota y aparecerá ante nosotros un bello espectáculo. En la proyección de la gota bailan sin descanso objetos diminutos rodeados por intensas auras verdes; si hay pocos, podemos usar agua impura o soplar un poco.

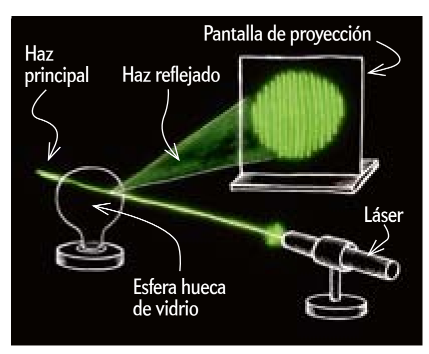

Impurezas en una gota de agua

Trabajemos en un soporte estable y libre de toda vibración. Comprobaremos que el baile de las partículas no cesa; lo que ocurre es que el agua se evapora porque parte de la energía del haz láser es absorbida, calentándolo todo y formando corrientes de convección.

Parte de la fotónica trabaja precisamente en esos dominios, intentando eliminar esas auras verdes, es decir, el ruido inherente al trabajo con ondas que interfieren continuamente entre sí. Pero a veces son los propios fenómenos de interferencia los que nos permiten investigar la materia a escala submicroscópica. La interferometría es una herramienta extraordinaria que se aplica también en los más dispares ámbitos de conocimiento; para nuestra fortuna, observar elegantes franjas de interferencia puede ser muy sencillo.

7 **Luz que interfiere.** Solo necesitaremos un pequeño vidrio de reloj (sirven una esfera hueca de vidrio o la pared del propio radiómetro). Montemos el láser de forma estable y proyectemos el rayo verde

contra él, vidrio o esfera. Observemos que, en su mayor parte, atraviesa el material; este haz principal no nos interesa. Si giramos la pieza de vidrio hasta formar un ángulo de unos 20º o 30º, observaremos un haz secundario, más débil: el haz reflejado. Ahora, a uno o dos metros, situemos una cartulina blanca que lo intercepte.





La imagen que observaremos será muy curiosa: un patrón regular de franjas brillantes y oscuras. Su origen radica en que el haz láser se ha convertido en dos al impactar contra las dos superficies del vidrio, pero solo uno ha sufrido el retraso impuesto por el tránsito por su interior; el otro se ha reflejado en la cara externa y, por tanto, le ha adelantado un poco. Los dos trenes de ondas ligeramente desfasadas se superponen, interfiriendo y generando un patrón de luz y oscuridad.

El fenómeno es ultrasensible a todo: un ligero incremento en el espesor del medio, algún defecto en la composición, incluso minúsculos cambios superficiales se hacen perceptibles en el patrón de franjas; por supuesto, también es adecuado para detectar las diferencias de recorrido óptico.

Con instrumentos delicadísimos se ha conseguido topografiar la superficie de elementos ópticos a escala casi atómica. ¿Alguien puede superar esto? Y es que solo la luz, ese misterioso fenómeno ora corpuscular ora ondulatorio, es nuestra aliada desde la dimensión cósmica a la nanométrica, pasando por la tecnológica y la divulgativa.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Dos es igual a uno

... luego yo soy el papa de Roma

En *Los matemáticos no son gente seria*, de Claudi Alsina y Miguel de Guzmán, dos de los grandes divulgadores españoles de matemáticas, se comenta una anécdota muy conocida atribuida a Bertrand Russell (1872-1970). Parece ser que, durante una de sus exposiciones, el filósofo y matemático comenzó a explicar cómo a partir de una proposición falsa podía deducirse cualquier cosa. Alguien le preguntó: «¿Quiere decir que, si 2 + 2 = 5, entonces usted es el papa de Roma?».

Russell respondió al vuelo con la siguiente demostración: «Si 2 + 2 = 5, convendrán conmigo en que, si restamos 2 a cada lado de la igualdad, obtendremos que 2 = 3. Si invertimos la expresión, llegaremos a 3 = 2, de lo cual, al restar 1 a cada lado, nos quedará 2 = 1. Dado que el papa de Roma y yo somos dos personas, y que 2 = 1, entonces el papa y yo somos una persona. Luego yo soy el papa de Roma». Con su agnosticismo beligerante y su peculiar humor británico, Russell nos ilustra aquí cómo, en efecto, un enunciado falso permite demostrar cualquier otro.

El tema ha llegado a ser motivo de reflexión incluso en la literatura. En la celebérrima novela *1984*, publicada en 1949 por George Orwell (1903-1950), el protagonista, Winston Smith, elucubra sobre si el Estado poseerá suficiente capacidad de manipulación para convertir en una verdad aceptada un enunciado como «dos más dos es igual a cinco». Y en *La vida, el universo y todo lo demás* (1982), el tercer libro de los cinco que conforman la serie de ciencia ficción surrealista e hilarante *Guía del autostopista galáctico*, de Douglas Adams, se describen las *bistromatemáticas*: «Así como Einstein observó que el espacio no es absoluto, sino que depende del movimiento del observador en el tiempo, los números no son absolutos, sino que dependen de movimiento del observador en los restaurantes».

Pero, sin duda, la palma se la lleva uno de los cuentos de la recopilación *La historia de tu vida* (1988), de Ted Chiang. La ficción de marras, titulada *Dividido entre cero*, trata sobre un inquietante descubrimiento realizado por Renee, una matemática genial. Ella misma lo describe en los siguientes términos: «He descubierto un formalismo que permite igualar cualquier número con cualquier otro. Esa página demuestra que 1 y 2 son iguales. [...] No hay operaciones ilegítimas, no hay términos mal definidos, no hay axiomas independientes que estén asumidos de forma implícita, no hay nada. La demostración no emplea absolutamente nada prohibido. [...] La aritmética como sistema formal es inconsistente. [...] Acabo de refutar la mayor parte de las matemáticas; ahora ya no tienen sentido». En el cuento, ningún matemático es capaz de encontrar fallos en la demostración de Renee.

A continuación presentaré seis «demostraciones» de la igualdad 2 = 1. Por supuesto, se trata de sofismas: razonamientos que formalmente aparentan ser irreprochables, pero que incluyen uno o varios errores que conducen a resultados absurdos. Un ejemplo clásico es el siguiente: «Lo que no perdiste, lo tienes; no perdiste los cuernos, por tanto, tienes cuernos».

Los sofismas constituyen una excelente herramienta didáctica y una fuente de disfrute matemático por el reto que representan. Encabezaré cada falacia con un texto extraído del cuento de Chiang. Tómense su tiempo. Al final encontrarán una breve disquisición, supuestamente iluminadora, sobre cada una de ellas.

1 *Existe una «prueba» muy conocida que demuestra que 1 es igual a 2. Comienza con varias definiciones: «Si a = 1; si b = 1». Termina con la conclusión «a = 2a»; es decir, 1 es igual a 2. Escondida discretamente en el medio hay una división entre cero, y en ese punto la prueba se ha extralimitado, vaciando y anulando todas las reglas. Dar por buena una división entre cero permite no solo demostrar que 1 y 2 son iguales, sino que dos números cualesquiera (reales o imaginarios, racionales o irracionales) son iguales.*

Todos hemos tropezado alguna vez con demostraciones algebraicas falaces que finalizan con la identidad 2 = 1. La mayoría suelen ser poco sutiles, ya que se sustentan en una división entre 0 más o menos enmascarada en algún paso.

Con toda seguridad han visto la siguiente, pero no puedo resistirme a que aparezca en esta selección: $a = b$; $a^2 = b^2$; $a^2 = ab$; $a^2 - ab = a^2 - b^2$; $a(a - b) = (a + b)(a - b)$; $a = a + b$; $a = 2a$; $1 = 2$.

2 *En 1900, durante el Segundo Congreso Internacional de Matemáticos, David Hilbert propuso una lista de los que consideraba los 23 problemas sin resolver más importantes de las matemáticas. El segundo punto era la petición de una prueba sobre la consistencia de la aritmética. Semejante demostración aseguraría la consistencia de buena parte de las matemáticas superiores. En esencia, lo que la prueba debía garantizar era la imposibilidad de demostrar que 1 es igual a 2. Pocos matemáticos lo consideraron un asunto de importancia.*

Observe la siguiente secuencia de identidades:

$$1 = 1^2\,,$$
$$2 + 2 = 2^2\,,$$
$$3 + 3 + 3 = 3^2\,,$$
$$4 + 4 + 4 + 4 = 4^2\,,$$
$$\ldots$$

Generalizando:

$$\underbrace{x + x + \cdots + x}_{x \text{ veces}} = x^2\,.$$

Derivando esta última identidad a izquierda y derecha, obtenemos:

$$\underbrace{1 + 1 + \cdots + 1}_{x \text{ veces}} = 2x\,,$$

que nos conduce a $x = 2x$ y, con ello, a $1 = 2$.

❸ *En 1931, Kurt Gödel demostró dos teoremas. El primero establece que las matemáticas contienen enunciados que pueden ser ciertos pero que resultan intrínsecamente imposibles de demostrar. Incluso un sistema formal tan simple como la aritmética permite enunciados precisos, llenos de significado y que parecen ciertos con toda probabilidad, pero que, sin embargo, no pueden ser demostrados por medios formales.*

Su segundo teorema establece que la consistencia de la aritmética es un enunciado de ese tipo: no puede demostrarse por ningún medio a partir de los axiomas de la aritmética. Esto es, la aritmética como sistema formal no puede garantizar que nunca producirá resultados como «1 = 2»; estas contradicciones pueden no haber sido detectadas hasta ahora, pero es imposible demostrar que jamás lo serán.

Partamos de la siguiente identidad: $\frac{-1}{1} = \frac{1}{-1}$. Extrayendo raíces cuadradas a ambos lados, obtenemos $\sqrt{\frac{-1}{1}} = \sqrt{\frac{1}{-1}}$, de donde $\frac{\sqrt{-1}}{\sqrt{1}} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{-1}}$. Empleando ahora la célebre notación de Euler para la unidad imaginaria, $\sqrt{-1} = i$, podemos reescribir la última igualdad como $\frac{i}{1} = \frac{1}{i}$. Dividiendo entre 2, sumando $\frac{3}{2i}$ y multiplicando por i a ambos lados, llegamos a:

$$i\left(\frac{i}{2}+\frac{3}{2i}\right)=i\left(\frac{1}{2i}+\frac{3}{2i}\right)$$

Y, desarrollando el producto:

$$\frac{i^2}{2}+\frac{3i}{2i}=\frac{i}{2i}+\frac{3i}{2i}$$

Puesto que $i^2 = -1$, tenemos que $-\frac{1}{2}+\frac{3}{2}=\frac{1}{2}+\frac{3}{2}$, expresión que nos conduce a nuestra querida identidad, 1 = 2.

❹ *En 1936, Gerhard Gentzen aportó una prueba de la consistencia de la aritmética. Pero para hacerlo tuvo que usar una técnica polémica, conocida como inducción transfinita.*

Este método no se encuentra entre los empleados habitualmente en las demostraciones, y difícilmente parecía apropiado para garantizar la consistencia de la aritmética. Lo que Gentzen había hecho era demostrar lo obvio suponiendo la certeza de algo dudoso.

Calculemos por partes la integral de la función $1/(x \log x)$:

$$\int \frac{1}{x\log x}\,dx = \frac{1}{\log x}\log x - \int \frac{-1}{x\log^2 x}\log x\,dx\,.$$

Simplificando, obtenemos:

$$\int \frac{1}{x\log x}\,dx = 1 + \int \frac{1}{x\log x}\,dx\,;$$

es decir, 0 = 1. Sumando 1 a ambos lados, *voilà*: 1 = 2.



❺ *Hilbert dijo: «Si el pensamiento matemático es defectuoso, ¿dónde encontraremos verdad y certidumbre?».*

Puede demostrarse que la serie $\frac{1}{1\cdot 3}+\frac{1}{3\cdot 5}+\frac{1}{5\cdot 7}+\cdots$ es convergente. Llamemos S a la suma. Podemos reescribirla como:

$$S=\frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{1}-\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{3}-\frac{1}{5}\right)+\left(\frac{1}{5}-\frac{1}{7}\right)+\cdots\right].$$

Y, reordenando los términos:

$$S=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1}+\left(\frac{1}{3}-\frac{1}{3}\right)+\left(\frac{1}{5}-\frac{1}{5}\right)+\left(\frac{1}{7}-\frac{1}{7}\right)+\cdots\right].$$

Con lo que:

$$S=\frac{1}{2}\,[1+0+0+0+\cdots]=\frac{1}{2}\,.$$

Sin embargo, también podemos reescribir la serie inicial como:

$$S=\left(\frac{1}{1}-\frac{2}{3}\right)+\left(\frac{2}{3}-\frac{3}{5}\right)+\left(\frac{3}{5}-\frac{4}{7}\right)+\cdots\,.$$

Pero ahora, al reordenar los términos de la siguiente manera:

$$S=\frac{1}{1}+\left(\frac{2}{3}-\frac{2}{3}\right)+\left(\frac{1}{5}-\frac{1}{5}\right)+\left(\frac{1}{7}-\frac{1}{7}\right)+\cdots\,,$$

llegamos a:

$$S = 1+0+0+0+\cdots = 1\,.$$

Así que acabamos de demostrar que $S = \frac{1}{2} = 1$, o, como viene siendo habitual, que 1 = 2.

❻ *Albert Einstein dijo: «En la medida en que las proposiciones de las matemáticas dan cuenta de la realidad, no son seguras; y en la medida en que son seguras, no describen la realidad».*

Acabemos con unas fracciones continuas. Partiendo de la identidad $1=\frac{2}{3-1}$ y usándola reiteradamente, obtenemos la siguiente expresión:

$$1=\frac{2}{3-1}=\frac{2}{3-\frac{2}{3-1}}=\frac{2}{3-\frac{2}{3-\frac{2}{3-\cdots}}}\,.$$

Repitiendo la estrategia con la identidad $2=\frac{2}{3-2}$, llegamos a:

$$2=\frac{2}{3-2}=\frac{2}{3-\frac{2}{3-2}}=\frac{2}{3-\frac{2}{3-\frac{2}{3-\cdots}}}\,.$$

Pero ambas fracciones continuas son idénticas, luego hemos demostrado que 1 = 2.

Comentarios a las falacias

❶ En el primer ejemplo, el error se produce al dividir entre $(a - b)$, ya que, puesto que $a = b$, estamos dividiendo entre 0. Pero ¿por qué la división entre cero genera estas falacias?

La división se define a partir de la multiplicación. Si suponemos que $\frac{1}{0}$ representa un número concreto, x, estaremos afirmando que x satisface la ecuación $0 \cdot x = 1$; es decir, 0 = 1.

Dado que hemos llegado a una conclusión errónea, no nos queda más remedio que admitir que no existe tal número x. Por tanto, la división entre 0 no está definida, de modo que su uso puede conducir a resultados absurdos.

❷ Observemos que la función $f(x) = x + x + \cdots + x$ que satisface la igualdad $f(x) = x^2$ está definida como la suma de x términos, por lo que solo tiene sentido para valores naturales de x. Así pues, la función no es continua y, por tanto, tampoco derivable.

❸ Recordemos que la función raíz cuadrada, $\sqrt{a}$, es multivaluada, ya que $a^2 = (-a)^2$. Es decir, no está definida de manera unívoca, sino que proporciona dos resultados, los cuales podemos denotar como $+|\sqrt{a}|$ y $-|\sqrt{a}|$. Esta sutileza se encuentra en la base de muchas falsas demostraciones, como la siguiente: $(-1)(-1) = 1$; $\sqrt{(-1)(-1)} = \sqrt{1}$; $\sqrt{-1}\sqrt{-1} = 1$; $i^2 = 1$; $-1 = 1$.

En el ejemplo número 3, el segundo paso (extraer raíces a ambos lados) puede parecer el origen de la falacia, pero no lo es: basta con determinar el valor principal de ambas raíces. El ardid se perpetra en el tercer paso, ya que no existe regla que garantice que $\sqrt{a/b} = \sqrt{a}/\sqrt{b}$ excepto si a y b son mayores que cero.

La única manera de que dos números x e y (distintos de cero) tengan el mismo cuadrado es que $x = y$ o $x = -y$. En nuestro caso, podíamos haber usado $\sqrt{a/b} = \sqrt{a}/\sqrt{b}$ o $\sqrt{a/b} = -\sqrt{a}/\sqrt{b}$. Si en el segundo miembro del tercer paso de la «demostración» empleamos el signo menos, la falacia se esfuma.

❹ Al calcular una integral indefinida aparece siempre una constante arbitraria. En nuestro caso, la falacia se desvanece si introducimos los límites de integración:

$$\int_a^b \frac{1}{x\log x}\,dx = 1\Big|_a^b + \int_a^b \frac{1}{x\log x}\,dx\,.$$

Puesto que la diferencia de una función constante entre dos valores cualesquiera es siempre cero, la integral definida que aparece a ambos lados de la igualdad es la misma, lo que evita la contradicción.

❺ El ejemplo clásico de este tipo de falacias es el siguiente:

$$\begin{aligned} 0 &= 0 + 0 + 0 + \cdots \\ &= (1-1) + (1-1) + (1-1) + \cdots \\ &= 1 + (-1+1) + (-1+1) + (-1+1) + \cdots \\ &= 1 + 0 + 0 + 0 + \cdots \\ &= 1\,. \end{aligned}$$

En 1703, el monje y matemático Luigi Guido Grandi (1671-1742) sostuvo en *Quadratura circuli et hyperbolae* que lo anterior constituía una demostración de que Dios había creado el mundo desde la nada, dando visos de poder ultraterreno a la ley asociativa de la suma.

Un siglo y medio después, Bernhard Riemann (1826-1866) demostró que los términos de una serie simplemente convergente siempre pueden reordenarse de tal modo que su suma sea cualquier número finito dado, más o menos infinito. Solo si una serie es absolutamente convergente (es decir, si la serie original converge y también lo hace la formada por los valores absolutos de sus términos) podemos alterar el orden y reagrupar los términos como deseemos, ya que en tal caso obtendremos siempre el mismo resultado.

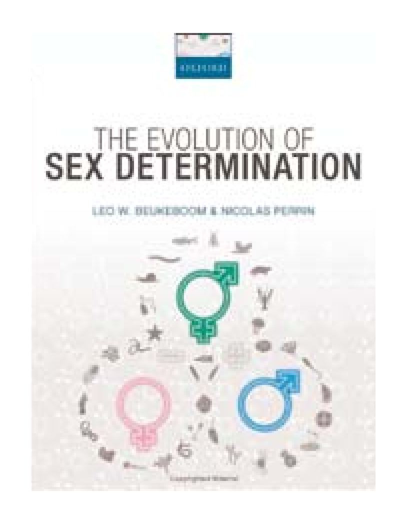
❻ La demostración de Renee era impecable. Esta también... ¿o no? Discútanla con sus amigos y cuéntenme sus conclusiones. La matemática al completo está en juego.

PARA SABER MÁS

Paradojas matemáticas. Eugene P. Northrop. Editorial UTEHA, México, 1949.

Matemática insólita: Paradojas y paralogismos. Bryan H. Bunch. Editorial Reverté, 1987.

Mathematical fallacies, flaws, and flimflam. Edward J. Barbeau. The Mathematical Association of America, 2000.



THE EVOLUTION OF SEX DETERMINATION

Por Leo Beukeboom y Nicolas Perrin. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Determinación del sexo

La sexualidad, un enigma evolutivo

El sexo ocupa un lugar central en la concepción humana del mundo vivo. De hecho, la distinción entre macho y hembra se encuentra profundamente enraizada en nuestro cerebro. La biología del sexo y la conceptualización social del sexo (género) acompañan nuestra vida diaria. Masculinidad y feminidad son elementos simbólicos fundamentales de todas las culturas humanas. Según la doctrina taoísta, todos los fenómenos del universo parten de la interacción entre el principio femenino (yin) y el masculino (yang). Existen razones biológicas para esa fascinación cultural por el sexo: se requiere para la reproducción humana. Sin embargo, frente al prominente papel de la mujer en esa tarea, sobre quien recae la carga del embarazo y la lactancia, la contribución exacta del varón en el proceso reproductor ha sido objeto de largos debates e interpretaciones contradictorias.

¿Qué entender por sexo? Existen al menos dos definiciones biológicas. La primera considera el sexo como intercambio genético entre individuos. La segunda lo explica por la presencia de meiosis. Aunque ambas definiciones se solapan en buena parte de su recorrido, no dejan de presentar importantes diferencias: la transmisión vírica no es sexo, la autofecundación es una forma de sexo y hay tipos diversos de partenogénesis. Meiosis y mitosis portan numerosas semejanzas. Una y otra implican división celular y recombinación genética. Pero uno y otro proceso divergen también en varios aspectos importantes: la recombinación mitótica se produce entre cromátidas hermanas, no hay intercambio de material genético y termina con dos células diploides genéticamente idénticas. En cambio, la recombinación meiótica se da entre cromosomas homólogos, hay intercambio y se producen cuatro células haploides genéticamente únicas. El sexo meiótico es un proceso complejo en dos etapas, iniciado por singamia, es decir, la fusión de dos células haploides para formar un cigoto diploide, y terminando con la reducción a la haploidía a través de la meiosis.

Encontramos sexo meiótico en la mayoría de los linajes de eucariotas. Ampliamente difundido, es conspicuo entre grandes formas multicelulares; no así en las unicelulares, donde puede ser facultativo y expresarse solo en condiciones específicas y crípticas. El sexo meiótico se asocia a menudo con la reproducción. A veces de una forma inseparable. Los humanos nos reproducimos solo sexualmente, e igualmente todos los demás mamíferos.

La reproducción sexual se cuenta entre las notas integrantes de la definición de vida. Llamamos vivo a lo que, en potencia, está capacitado para reproducirse. Requiere, por lo común, el desarrollo de una meiosis y la fusión de dos gametos de sexos diferentes. Importa distinguir entre determinación sexual y diferenciación sexual. Por la primera se entiende la etapa del desarrollo en que el destino del individuo conduce a la condición de macho o de hembra. La diferenciación abarca las etapas del desarrollo durante las cuales se van formando los fenotipos masculinos y femeninos de acuerdo con la decisión inicial de la determinación. En muchos casos, la determinación del sexo es genética: machos y hembras portan alelos o genes diferentes que especifican su morfología sexual. En los animales, ello suele ir acompañado de diferencias cromosómicas. En otros casos, el sexo puede venir determinado por el medio (la temperatura, por ejemplo) o por variables sociales (el tamaño de un organismo en relación a otros miembros de su población). El ámbito de la determinación del sexo se ciñe a veces a la acción del desencadenante inicial (activación de *Sry* en los terios), mientras que el desarrollo consiguiente de las gónadas en ovarios o testes (o de los meristemos florales en carpelos y estambres) se refiere a la diferenciación sexual primaria.

No obstante, el sexo no es intrínsecamente un proceso reproductor. La mayoría de los linajes a lo largo de la filogenia eucariota han mantenido una forma de reproducción asexual (que se da durante la fase haploide, durante la fase diploide o en ambas). En muchos grupos los dos procesos se hallan disociados: los dinoflagelados, por ejemplo, se reproducen solo asexualmente, a través de mitosis haploides. Durante el ciclo sexual se fusionan dos células haploides para formar un cigoto, pero se deja un núcleo haploide tras la meiosis (los tres restantes se descartan). Como mucho, puede generalizarse que la mayoría de los eucariotas presentan alguna forma de sexo. Más allá de ello, casi todos los atributos que asignamos al sexo suelen ser específicos del linaje. La sexualidad meiótica constituye uno de los rasgos unificadores de la radiación y diversidad eucariota. Los mismos genes que controlan la meiosis se han encontrado en los principales linajes, incluidas formas menos conocidas de hongos inferiores, clorofíceas, rodofíceas, fenofíceas, diatomeas y muchos más. El sexo se ha perdido en algunos linajes, muy pocos. Los que tienen solo reproducción asexual (o autofecundación obligada) muestran unas tasas de extinción muy altas: tienden a ocupar las puntas de las ramas filogenéticas, son recientes y presumiblemente de vida corta.

Descifrar la estructura y función de los tipos de apareamiento ha ensanchado las perspectivas sobre el origen de la sexualidad masculina y femenina. Sorprendentemente, los mecanismos de determinación del sexo no se han conservado en el curso de la evolución, sino que han ido adquiriendo una amplísima diversidad y mutado con celeridad. ¿Qué mueve la dinámica de ese proceso fundamental que conduce siempre a un mismo resultado: dos tipos sexuales, el macho y la hembra?

Los mecanismos que determinan el sexo han interesado a los biólogos desde

siempre, por su universalidad e importancia crítica en todas las formas de vida. En 1983, James Bull publicó una excelente síntesis de la cuestión en *Evolution of sex determining mechanisms*. Hasta la fecha no había aparecido ninguna actualización. Este libro sale al paso de esa deficiencia, sin alejarse de la idea central, a saber: los sistemas de determinación del sexo, que se dirían singulares e independientes, forman en realidad un continuo de fondo. Tampoco existe fundamento para la dicotomía clásica entre determinación genética y determinación ambiental. El sexo constituye un fenómeno umbral, lábil, influido por la herencia y por el medio.

Con Pitágoras (570-495 a.C.) se esbozó la concepción «espermista», tesis que sostiene que el padre aporta los caracteres esenciales de la progenie, en tanto que la participación de la madre se limita al sustrato material. En 1676, Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) utilizó lentes que había tallado, de 270 aumentos, para investigar lo que, «sin sentimiento de pecado, permanece como resto después del coito conyugal», y establecía que aquella misteriosa sustancia, el semen, estaba habitada por una muchedumbre de animales anguiliformes. Pensó que esos «animálculos espermáticos» desempeñaban un papel crucial al suministrar su sustancia al embrión, en tanto que el óvulo proporcionaría nutrición. En 1694, Nicolaas Hartsoeker (1656-1725), ayudante de Leeuwenhoek y codescubridor de los espermatozoides, ilustró su visión espermista con un dibujo de un humano preformado en el interior de una célula espermática, el homúnculo.

En el siglo XVIII, el preste italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799) demostró experimentalmente, en anfibios, que el esperma del macho era necesario para la fecundación de los óvulos de la hembra. En 1827, el embriólogo Karl Ernst von Baer (1792-1876), descubridor del óvulo de los mamíferos, acuñó el término espermatozoo. Puso en 1841 orden en la maraña conceptual todavía reinante otro embriólogo, Albert von Kölliker (1817-1905), quien, tras examinar bajo el microscopio procesos de fecundación en diversos animales marinos, llegó a la conclusión de que los espermatozoos no eran animales preformados, sino productos de las células de los testes, que necesitaban del contacto con el óvulo para una reproducción exitosa. La fusión entre óvulo y espermatozoo fue observada finalmente en 1876 por el zoólogo Oskar Hertwig.

Una historia pareja ha recorrido en diferentes culturas y épocas la vía de determinación del sexo. Parménides, en el siglo VI a.C., propuso que el sexo dependía del lado de la matriz donde se instalara el embrión; para Anaxágoras, del V a.C., el sexo dependía de los testes del progenitor. Aristóteles, en el siglo IV a.C. criticó ambas teorías, aportando pruebas de que, en los animales, los embriones de ambos sexos pueden instalarse en el mismo lado del útero y que los varones con un solo teste podían tener hijos de ambos sexos. Siguiendo las ideas de Empédocles sobre los cuatro elementos, Aristóteles propuso que los machos se caracterizaban por una abundancia de fuego, por cuyo motivo eran cálidos y secos, mientras que las hembras, con abundancia de agua, eran frías y húmedas. Por consiguiente, el sexo de un engendrado viene determinado por el calor del progenitor masculino durante la relación sexual. En el siglo XVIII, el anatomista Michel Procope-Couteau (1684-1753) retomó las ideas de Parménides y Anaxágoras, y sugirió que el mejor camino para controlar el sexo del niño sería eliminar el teste o el ovario conectado con el sexo no deseado.

Las teorías ambientalistas o epigenéticas sobre la determinación del sexo han predominado hasta no hace mucho. A finales del siglo XIX se creía que el alimento constituía el factor determinante; el sexo vendría determinado por la nutrición de la madre durante los tres primeros meses de embarazo: una dieta pobre producía machos; una dieta rica, hembras. Las opiniones epigenéticas fueron abandonándose tras el descubrimiento de los cromosomas sexuales. Henking observó en 1891 que un elemento de la meiosis de macho de *Pyrrhocoris apterus* (con un sistema XX-X0) se transmitía solo a la mitad del esperma. Aludió a ese elemento como «X», es decir, desconocido. En 1902, McClung postuló que era este un cromosoma, el responsable del sexo. Lo llamó cromosoma X. La implicación del cromosoma X en la determinación del sexo recibió apoyo ulterior de la obra de Bridges, quien analizó individuos de *Drosophila* con constitución aberrante de cromosomas sexuales.

Por las mismas fechas iniciales del siglo XX, los biólogos se percataron de que la constitución cromosómica humana difería entre varones y hembras. De los 23 pares de cromosomas, uno es heteromórfico en los varones (con un pequeño cromosoma Y formando par con su poderoso homólogo X), mientras que en la mujer el par era homórfico (XX). Conforme avanzaba la centuria, se fue descubriendo que, en los humanos, las diferencias sexuales esconden diferencias génicas: el cromosoma Y contiene genes, incluido el gen *Sry*, que se requieren para la determinación y diferenciación de la masculinidad. El sexo de un niño depende de si el espermatozoide paterno que fecundó el óvulo materno contribuyó con un cromosoma X o con un cromosoma Y.

Las perspectivas evolutivas sobre el sexo están cuestionando ideas intuitivas que se suponían asentadas. Citemos solo tres. En primer lugar, aunque asociado con la reproducción en muchos linajes multicelulares, el sexo no es fundamentalmente un proceso reproductor, toda vez que los costes resultan mucho mayores que los beneficios. Tampoco implica intercurso sexual: la fecundación externa, tras la eclosión de los gametos, es común en muchos organismos. No se requiere macho y hembra para crear progenie; pensemos en muchos insectos. Por fin, en la larga historia del sexo, machos y hembras tardaron en llegar; en vez de dos sexos diferenciados, numerosos organismos presentan tipos de apareamiento morfológicamente similares, que en los hongos se cuentan por docenas o cientos.

Pudiera parecer que con su origen temprano en los eucariotas y su distribución casi universal, el sexo debería aportar grandes y obvias ventajas evolutivas. Pero resultan más llamativos los costes que los beneficios. Costes que son de tipos muy dispares. En primer lugar, los costes fisiológicos, intrínsecos de la meiosis. En los unicelulares, se gasta más energía en alcanzar la meiosis que la mitosis. Durante el tiempo necesario para conjugar y reorganizar los núcleos, una célula de levadura podría experimentar ocho mitosis, produciendo 256 células hijas (esto es, 2^8). Ello puede parecer un coste muy oneroso, que queda aliviado cuando expresan sexo aprovechando que las condiciones ambientales son menos favorables para el desarrollo. El hecho de que el sexo (como la transformación en bacterias) se exprese a menudo bajo condiciones de estrés (por ejemplo, bajo escasez de nitrógeno en *Chlamydomonas*), no implica necesariamente que constituya una adaptación a esas condiciones, sino que explota entonces unas circunstancias de coste mínimo. Como resultado de esas asociaciones, los cigotos se especializan a menudo en es-

tados de reposo, lo mismo en eucariotas unicelulares que pluricelulares.

Aumentan los costes cuando el sexo implica un intercambio genético entre diferentes individuos (reproducción cruzada, frente a autofecundación o clonación). En primer lugar, el cruzamiento puede inducir una importante carga de recombinación, por disgregación de combinaciones beneficiosas de genes adquiridas durante la selección. En segundo lugar, el propio proceso de apareamiento es costoso. La constitución de los órganos de la reproducción del macho y la hembra, así como los caracteres secundarios, imponen una carga pesada en inversión energética. Dar con un compañero sexual puede a veces ser arduo, en particular si la densidad de población es baja. El apareamiento difunde, además, las enfermedades de transmisión sexual e induce riesgos de depredación, sobre todo si comporta un despliegue o una exhibición llamativa.

Los genomas han de cumplir una diversidad de funciones durante el ciclo biológico de un organismo. Por ello codifican una diversidad de programas que deben ser silenciados o expresados según la situación. Ello se aplica también a los sexos y tipos de apareamiento. Los genomas son fundamentalmente bipotentes, dotados de capacidad para promover un sexo u otro de acuerdo con determinadas claves específicas. Ese enunciado es enteramente cierto en sistemas con determinación ambiental del sexo: un embrión de tortuga se desarrollará en macho o hembra según la temperatura de incubación. Y es casi cierto de sistemas con determinación sexual genotípica: un XY humano o de *Drosophila* porta pares de todos los genes requeridos para desarrollarse en una hembra; los individuos XX pueden desarrollar también fenotipos masculinos (si bien no serán fértiles porque les faltarán los genes ligados al cromosoma Y requeridos para la formación adecuada de testes).

Los mecanismos de la determinación del sexo abarcan no solo el desencadenante inicial que dirige un programa de desarrollo del organismo hacia un sino masculina o femenino, sino que aseguran también la presencia de genes que organizan la diferenciación sexual primaria. La diferenciación sexual es un proceso complejo, que requiere redes reguladoras génicas, con bucles de realimentación y antagonismos dinámicos.

—*Luis Alonso*



THE QUANTUM MOMENT. HOW PLANCK, BOHR, EINSTEIN, AND HEISENBERG TAUGHT US TO LOVE UNCERTAINTY

Por Robert P. Crease y Alfred Scharff Goldhaber. W. W. Norton & Company, Nueva York, 2014.

Sociología de la ciencia

Impacto cultural de la física clásica y cuántica

El descubrimiento de lo cuántico (la idea según la cual la energía cursa en paquetes finitos y no en cantidades infinitamente divisibles) despertó un elenco rico de metáforas en la imaginación popular. El término *cuántico* se ha introducido en la poesía, cine, pintura, ficción, filosofía, psicología y neurociencia. Expresiones tales como *saltos cuánticos*, *multiversos*, *universos paralelos*, *principio de indeterminación* y *gato de Schrödinger* han pasado al lenguaje coloquial. Han arraigado como memes culturales. ¿Son grandes o pequeños los saltos cuánticos? ¿Cuán incierto es el principio de incertidumbre? ¿Es esotérico el lenguaje cuántico o solo otra forma de nuestra manera de pensar?

El título del libro de cabecera responde al nombre de la asignatura cuya docencia, para un alumnado heterogéneo de ciencias y letras, se reparten ambos autores Alfred Scharff Goldhaber, físico, y Robert P. Crease, filósofo. El curso estudia el impacto cultural de lo cuántico. El cuanto fue introducido en 1900 para explicar ciertos resultados desconcertantes, obtenidos en un rincón remoto de la física dedicado a la absorción y emisión de luz. A ello siguieron dos revoluciones cuánticas. La primera sucedió entre 1900 y 1925; los científicos discutieron y desarrollaron la teoría sin atraer apenas la atención del gran público. De la segunda revolución, entre 1925 y 1927, emergió la mecánica cuántica, cuyas curiosas implicaciones pasaron a ser tema de debate común. Incluso hoy, ochenta años después, mantiene su interés sorprendente, visionario y contrario a la intuición.

Los alumnos de la asignatura mencionada manejan libros y artículos de historia, filosofía y sociología, obras de teatro (recordemos *Copenhague*, de Michael Frayn), novelas y películas. En clase se explica el desarrollo de los conceptos fundamentales de la teoría cuántica. Conocidos en lo posible los fundamentos físicos, corresponde a los estudiantes descubrir el uso y abuso del lenguaje y las imágenes cuánticas. Goldhaber enseña las bases de una teoría, hoy plenamente desarrollada, sobre la materia y la energía. Crease ayuda a explorar las implicaciones filosóficas de los conceptos de espacio, tiempo, causalidad y objetividad. Prestaremos atención a la exposición del físico.

Pero no es ninguna novedad la repercusión de la física y sus avances en la cultura y en la vida de la humanidad. Ni sus dificultades. Erwin Schrödinger puso en 1935 la imagen del ahora célebre gato como recurso lúdico para mostrar la incapacidad de sus colegas a la hora de pensar desde una perspectiva mecanocuántica. Para entender el fenómeno y el marco en que apareció la cuántica necesitamos remontarnos a Isaac Newton (1642-1727), cuyo impacto en la filosofía y la cultura en general nadie cuestionará.

Newton vio la luz el año en que se desencadenó la primera guerra civil inglesa. Habría tres entre 1642 y 1651. Lo único que se tenía claro por entonces era que el

firmamento y la Tierra eran mundos distintos, con comportamientos diferentes. La bóveda celeste era eterna, los objetos terrestres cambiaban y morían, transformándose en otras cosas. Cambiaban porque había fuerzas ocultas. Newton daría un vuelco radical a esa doctrina. De niño se entretenía construyendo ingenios mecánicos: molinos de viento, relojes de agua y cometas o leyendo los libros que le prestaba el boticario local. En el Trinity College de Cambridge estudió filosofía, matemática y física. La Gran Peste que asoló Inglaterra en 1665 le obligó a retirarse a la casa de campo materna, en Lincolnshire. Dedicó el tiempo al estudio ininterrumpido y puso las bases de muchos de sus descubrimientos fundamentales en física, astronomía, óptica y matemática. Se adentró en la alquimia y le interesó la piedra filosofal. Uno de sus grandes hallazgos fue el cálculo, del que se sirvió para construir sus tres leyes del movimiento. Su obra magna, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicada en 1687, donde exponía las leyes del movimiento y la atracción gravitatoria universal, cambió la concepción del mundo.

El newtonianismo conformó el universo material y mental, industrial y científico. Los propios teóricos de la política comenzaron a buscar leyes que gobernaran el mundo de los hombres a la manera en que Newton había descubierto las leyes que gobernaban el mundo físico. Uno de los ayudantes de Newton, John Desaguliers, escribió un poema titulado «El sistema newtoniano del mundo, el mejor modelo de gobierno».

La simplicidad, elegancia e inteligibilidad del mundo newtoniano destacaban en su coherencia y belleza. Tierra y cielos pertenecían a un mismo universo, cuyo espacio, tiempo y leyes eran idénticas en cualquier escala. Se trataba de un mundo predecible, como caracterizó, decenios después, Pierre-Simon Laplace. Transcurridos apenas tres años de la muerte de este, John Herschel escribía en 1830 a William Whewell sobre la urgente necesidad de divulgar la ciencia, de escribir compendios de lo que se sabe en cada campo de la ciencia para ofrecer una visión coherente de lo que se sabe y de lo que falta por conocer. Que la ciencia empapara la vida intelectual. Quien dio los primeros pasos en esa dirección fue una autodidacta, Mary Fairfax Somerville. Su libro *On the connexion of physical sciences*, publicado en 1834, en la misma editorial donde vieron la luz los textos de Walter Scott, Lord Byron y Jane Austen, no contiene ecuaciones, solo algunos diagramas y escasa matemática. Pero se trata de una pieza maestra de la explicación descriptiva y de la analogía. En el mundo newtoniano los fenómenos podían producirse en cualquier escala. A propósito de la descripción de la gravitación universal, Somerville declara que se trata de una fuerza que actúa «lo mismo en la caída de una gota de agua que en las cataratas del Niágara, lo mismo en el peso del aire que en las fases de la Luna».

Antes, en 1809, se había dado un paso importante en la generalización de los conceptos científicos. Ese año, Johann Wolfgang von Goethe publicaba una novela, *Die Wahlverwandtschaften* («Afinidades electivas»), donde colocaba la ciencia en el centro de las preocupaciones humanas y, a los humanos, en el centro de la ciencia. Goethe subrayaba la primacía de la percepción humana en la comprensión de la naturaleza como una entidad holista. El título de la obra procede del químico sueco Torbern Bergman, un precursor de la tabla periódica. Igual que los elementos, los personajes de la novela de Goethe introducían nuevas relaciones cuando se agregaba un reactivo.

La obra de Newton impuso a los filósofos una nueva tarea. Muchos se percataron de que la física dependía de un espacio y tiempo infinitamente extensos y divisibles y una causalidad universal; ni unos ni otra eran autoevidentes (como las matemáticas), ni objetos hallados por experiencia. Inmanuel Kant mostró que esas ideas constituían condiciones de posibilidad de la experiencia, sin las cuales no era posible la consciencia humana; organizan los datos procedentes de los sentidos y confieren orden y coherencia a nuestra experiencia.

Los modelos mecánicos podían ya expresarse matemáticamente; la fuerza de la atracción gravitatoria entre dos cuerpos, por ejemplo, viene expresada por una constante multiplicada por el producto de las masas de los cuerpos dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos. Además, el mundo newtoniano podía prescindir de referencias finalistas; el movimiento de un carro se explicaba solo en términos de fuerzas y masas, cualquiera que fuera la intención de su conductor. Cada masa tiene una posición específica en un tiempo específico. Si se mueve, su tasa de cambio de posición con respecto al tiempo se denomina velocidad. Si la velocidad cambia, su tasa de cambio con respecto al tiempo se denomina aceleración. Las masas se aceleran en virtud de la acción de fuerzas. Las fuerzas surgen de la interacción entre cuerpos, por contacto y o por atracción o repulsión. Los *Principia* establecieron tres leyes del movimiento que se suponen válidas en todas las escalas y regiones del universo.

Más tarde, Charles Coulomb y otros estudiaron la atracción y repulsión eléctricas, a imitación de la ley universal de la gravitación. Descubrieron que la fuerza ejercida entre dos cargas eléctricas, o entre dos polos magnéticos, era proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Pero mientras que todas las masas son positivas, las cargas eléctricas o los polos pueden ser positivos o negativos; ello significa que las masas gravitatorias siempre se atraen entre sí, mientras que cargas y polos pueden atraerse o repelerse mutuamente. El concepto de campo (magnitud que tiene un valor específico para cada localización del espacio y tiempo) extendía el poder de la mecánica newtoniana. James Clerk Maxwell se percató de que los campos eléctricos cambiantes inducían campos magnéticos circulantes, estableciéndose un vínculo entre electricidad y magnetismo. Cuando armó el esqueleto conceptual del electromagnetismo obtuvo un resultado sorprendente: la luz correspondía a ondas de campos electromagnéticos.

La introducción de los cuantos sacudió los fundamentos del mundo newtoniano. El universo cuántico, contrario a toda intuición, carecía de simplicidad y elegancia. Por varias razones: primera, la diferencia a través de la escala, pues había que aplicar al micromundo leyes distintas de las que gobernaban el macromundo. Otra razón residía en la inhomogeneidad; ciertas cosas tienen un tipo de presencia en el mundo que difiere de la que muestran otras. Un tercer rasgo, la discontinuidad; los valores de las propiedades del espacio y el tiempo no fluían entre sí con la suavidad de lo que acontecía en la física newtoniana. Un cuarto aspecto, la incertidumbre; determinadas propiedades del universo newtoniano, tales como la posición y el movimiento, no podían establecerse a la vez y ni siquiera cabía afirmar que fueran reales. Un quinto, la impredictibilidad; y un sexto, la imposibilidad de prescindir del sujeto en ciertos tipos de medición.

Fue Max Planck (1858-1947) quien introdujo la noción de cuanto en la ciencia. Siendo alumno en la Universidad de Múnich, uno de sus profesores le aconsejó que abandonara la física «porque era una disciplina en la que ya estaba todo dicho y solo quedaba rellenar algunos agujeros». No le importó rellenar los huecos y limpiar el polvo de los rincones. Trasladado a Berlín, se centró en la termodinámica, campo de la física interesado en las relaciones entre calor, luz y energía. De nuevo sus profesores le aconsejaron que abandonara porque no había nada nuevo que descubrir. Tampoco esta vez siguió el aviso. A Planck no le atraían tanto las novedades cuanto consolidar fundamentos. Pero sería quien sacudiese esos cimientos.

Los materiales que mejor absorbían la luz incidente fueron llamados cuerpos negros por Gustav Kirchhoff. El gobierno alemán, instado por la industria eléctrica, pidió que se investigara la radiación de cuerpo negro. En 1892 Planck sucedió a Kirchhoff en la cátedra de Berlín e hizo suyo el problema. Un triple motivo le impulsaba: en cuanto servidor público trabajaría en un tema de interés nacional, la cuestión guardaba relación con trabajos que ya venía realizando y, por fin, el hecho de que el resplandor de las bombillas dependiera solo de la temperatura del material y no de su composición química sugería que la solución sería fundamental; de una manera similar a la naturaleza fundamental de la fuerza gravitatoria, señalada por su dependencia de la masa del cuerpo, no por su química.

Descubrió que los cuerpos absorbían y emitían luz selectivamente, como múltiplos enteros de cierta cantidad de energía, que él denominó $h\nu$, donde h es una constante que ahora lleva su nombre y ν es la frecuencia de la radiación. Si E es la energía y n un entero, la fórmula de la radiación de Planck será $E = nh\nu$. Muy pocos repararon en la idea de Planck. Solo cinco años después, el joven Albert Einstein, al redactar un ensayo sobre el efecto fotoeléctrico, explicaba la fórmula de Planck con una sugerencia radical: la propia energía lumínica procede en múltiplos de h. Los cuantos de energía de luz recibirían más tarde el nombre de fotones. Los cuantos no eran un ardid matemático, como había creído Planck, sino una entidad física. Tampoco la idea de Einstein tuvo mucho eco.

Todos los esfuerzos por encajar la teoría de Planck en la física clásica fracasaron. Los cuantos aparecían por doquier en el mundo subatómico. En 1911, la crema de la física europea se reunió en una conferencia en Bruselas sobre la cuestión. Bajo el patrocinio de la industria Solvay, el encuentro fue presidido por Walther Nernst, quien primero consideró grotesca la idea del cuanto para admitirla luego como indispensable. La aceptación fue *in crescendo*. En 1913 Niels Bohr se interesó al comprobar en su tesis doctoral que la física clásica no podía explicar las propiedades electromagnéticas de los metales. La teoría clásica predecía que los electrones en órbita radiarían energía y terminarían por colapsar en el núcleo. Pero si suponemos, expuso Bohr, que las órbitas del electrón pueden poseer solo momento angular en múltiplos de una nueva unidad natural, h/2p, entonces los electrones no tienen un número infinito de órbitas posibles alrededor del núcleo.

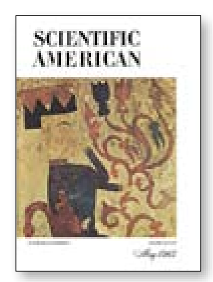
De todas las propiedades del mundo cuántico, una de las más espinosas es sin duda la identidad de las partículas, es decir, las formas que pueden adoptar. Hay dos clases posibles: bosones y fermiones. Los bosones siguen la estadística de Bose-Einstein; los fermiones, la de Fermi-Dirac. Esas dos posibilidades fueron descubiertas a mediados de los años veinte. Satyendra Nath Bose y Albert Einstein hallaron las propiedades de los bosones. El principio de exclusión de Wolfgang Pauli articulaba el comportamiento de los fermiones: dos fermiones idénticos (partículas con espín semientero, como los electrones) no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Principio estructural fundamental, gobierna todas las formas de materia, de los átomos a las interacciones químicas, pasando por cristales y metales.

En la segunda revolución cuántica, de 1925-27, los físicos se esforzaron en imaginarse juntas ondas y partículas. Todo dependía del enfoque. Muchos extraños al campo sacaron la conclusión de que podían tenerse aproximaciones contradictorias de una misma realidad. En 1925 Heisenberg acometió la descripción del mundo cuántico en términos de la matemática de sus propiedades observadas, en una mecánica de matrices. E introdujo el principio de indeterminación. En 1926, Erwin Schrödinger optó por enmarcarla en una mecánica de ondas; describía el cuanto como un tipo particular de onda que evolucionaba continua y predictiblemente en el tiempo de acuerdo con ecuaciones diferenciales.

—Luis Alonso



Recopilación de Daniel C. Schlenoff



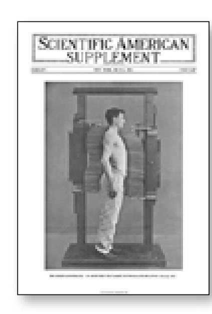
Mayo 1965

Escitas

«En la Siberia central, una tierra cuya prehistoria ha permanecido casi del todo desconocida, arqueólogos soviéticos han descubierto en años recientes restos de un pueblo antiguo que se han mantenido extraordinariamente inalterados. Consiste el hallazgo en un conjunto de túmulos funerarios en la zona alta del macizo de Altái, en la frontera entre Siberia y Mongolia Exterior. Allí, en esas cámaras heladas, se han conservado incorruptos los cuerpos de los antiguos caciques con sus caballos, ropas y pertenencias diversas. Aquellos jinetes pertenecían a una de las grandes tribus de "bárbaros", nómadas que vagaban por las estepas de Eurasia en tiempos de las antiguas Grecia y Persia y a quienes los escritores de entonces llamaban escitas.
—Mikhail I. Artamonov»

La verdad sobre los detectores de mentiras

«Un comité del Congreso de EE.UU. ha publicado un informe que arroja serias dudas sobre las pruebas con el "detector de mentiras" poligráfico y reconviene severamente al Gobierno federal por su empleo indiscriminado. La principal conclusión del comité es: "No existe un 'detector' de mentiras. Ni mecánico ni humano. La gente ha sido engañada por el mito de que una caja metálica en manos de un investigador puede descubrir la verdad o la falsedad". Señala el informe que el polígrafo es un instrumento que registra la respiración, la presión sanguínea y el pulso de una persona, así como su respuesta galvánica cutánea. Se trata de cambios fisiológicos que pueden estar vinculados, o no, a una reacción emocional, y tal reacción puede estar relacionada, o no, con la culpabilidad o la inocencia.»



Mayo 1915

Hundimiento del *Lusitania*

«El hundimiento, sin previo aviso, del *Lusitania* es el último y más atroz ejemplo de retroceso hacia aquella crueldad gratuita que todos creímos relegada a épocas pasadas ya muy lejanas. Uno de los fenómenos psicológicos de esta guerra es la refinada sofisticación con que Alemania ha intentado justificar sus innumerables violaciones de las leyes humanitarias de la guerra; y seguramente el más sorprendente ejemplo de ello sea que este país defienda hoy esa matanza de no combatientes inocentes afirmando que les avisó claramente de que se iba a ejecutar la acción. ¡Una nueva filosofía, sin duda!»

En el ataque murieron 1200 civiles, entre ellos 24 ciudadanos estadounidenses. El cargamento del barco incluía cuatro millones de balas de fusil.

Gas tóxico para la guerra

«En la actual guerra europea, el uso de los conocimientos parece estar alcanzando las cotas más altas del ingenio. Casi podría calificarse de guerra fisicoquímica. Lo último es la fabricación de gases venenosos para uso táctico (*véase la ilustración*). Los informes que hemos recibido parecen indicar que el gas utilizado hasta ahora es cloro. Los indicios de su presencia son su color amarillo verdoso, su fuerte olor y su gran densidad, que le hace fluir a ras de tierra. Los síntomas que muestran sus víctimas son los exhibidos por quienes han sido intoxicados por cloro en accidentes industriales.»



GUERRA QUÍMICA: Las tropas alemanas emplean por primera vez en combate el mortal gas cloro, 1915.



Mayo 1865

La ametralladora Gatling

«Este invento promete revolucionar el arte de la guerra. En experimentos realizados bajo la supervisión de oficiales del servicio de armamento pudo mantenerse una cadencia de tres disparos por segundo, con una penetración superior a la del fusil Springfield. Se reconoció que una de las armas del señor R. J. Gatting [*sic*] manejada por dos hombres colocaría más proyectiles en un blanco medio a trescientos cincuenta metros que un centenar de hombres. Los cañones y los cerrojos giran conjunta y continuamente y cada disparo se efectúa cuando su cañón llega a determinado punto. La munición fija (cartuchos metálicos que contienen la bala y la pólvora) es alimentada al arma desde cajas montadas en una tolva.»

Tasajo

«La cecina de vacuno sudamericana, o res desecada al aire, se está exportando a Inglaterra en grandes cantidades; allí es consumida por las clases más pobres y se vende a tres peniques. Es una carne correosa y dura, un alimento muy poco delicado, pero se dice que es mejor que no comer carne alguna.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXII, N.º 20, 15 DE MAYO DE 1915



ELECTRÓNICA MÉDICA

Medicina bioelectrónica

Kevin J. Tracey

La estimulación del sistema nervioso podría reemplazar a los fármacos en el tratamiento de enfermedades inflamatorias y autoinmunitarias.

NANOMECÁNICA

Máquinas accionadas por fuerzas interatómicas

Fabrizio Pinto

Mediante la manipulación de las fuerzas de Van der Waals pueden crearse nuevos tipos de sistemas de propulsión, dispositivos de almacenamiento de energía y nanomáquinas carentes de rozamiento.



LLUVIA RADIACTIVA

El impacto ecológico de la catástrofe de Fukushima

Steven Featherstone

Poco sabemos acerca de los efectos de la radiación de baja intensidad en los seres vivos y los ecosistemas. Cuatro años después del accidente nuclear, los expertos comienzan a obtener respuestas.

COSMOLOGÍA

El enigma de los púlsares ausentes

Heino Falcke y Michael Kramer

Si hubiera un radiopúlsar cerca del agujero negro del centro de la Vía Láctea, podríamos poner a prueba la teoría de la relatividad general en condiciones extremas de gravedad. Durante décadas los astrónomos no consiguieron que ningún ejemplar cayera en sus redes. Ahora que por fin han tenido éxito, el enigma parece aún más misterioso.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes y Guía genética de las aves*; Juan Pedro Adrados: *La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones*; Carlos Lorenzo: *La mente neandertal*; Juan Pedro Campos: *Apuntes, ¿Cómo afecta a las islas la subida del mar? y Foro científico*; Alfredo Marcos: *Naturaleza y finalidad*; Fabio Teixidó: *El origen del agua en la Tierra*; Carmen Bañuls: *Mundos cuánticos simulados*; Jacobo Chamorro: *Combatir el dolor crónico*; Tanja Sachse: *Electrónica con pulsos de luz*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España